



**Tielaitos**

## **Liikkuvan koneen paikantaminen servo-ohjatulla takymetrillä**



**Tielaitoksen  
selvityksiä**

**73/1992**

**Helsinki 1992**

**Helsingin  
tuotantotekninen  
kehitysyksikkö**



Tielaitoksen selvityksiä  
73/1992

**Liikkuvan koneen paikantaminen  
servo-ohjatulla takymetrillä**

**Tielaitos**  
Helsingin tuotantotekninen  
kehitysyksikkö

Helsinki 1992

ISBN 951-47-6856-6  
ISSN 0788-3722  
TIEL 3200123

PAINATUSKESKUS OY, HELSINKI 1993

Julkaisua myy:  
Tiehallitus, painotuotevarasto  
Telefax (90) 1487 2698

**Tielaitos**  
Tiehallitus  
Opastinsilta 12 A  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puh. vaihde (90) 148 721

## ALKUSANAT

Tässä tutkimuksessa on selvitetty servo-ohjatun takymetrin käyttömahdollisuuksia liikkuvan koneen paikannuslaitteena. Tämä raportti on jatkoa tielaitoksen selvitykseen "Mittausautomaation hyödyntäminen maanrakennuskoneiden ohjauksessa".

Alustavien selvitysten perusteella servo-ohjatun takymetrin todettiin olevan lähimpänä käytännön toteutusta toimivuuden ja tarkkuusvaatimusten perusteella. Tutkittava laite saatiin testikäyttöön maahantuojalta Geoditech Oy:ltä, jonka edustajat myös osallistuivat testauksen järjestelyihin ja testauksen suoritukseen.

Finnmap Oy on tehnyt laitteen toimivuustestit kesä-elokuussa 1992. Työtä on ohjannut projektiryhmä, johon kuuluivat:

Tapani Angervuori	TIEH/Hky (pj.)
Matti Laitinen	TIEL/U-piiri
Antti Piirainen	TIEH/Tky
Tauno Suominen	TIEH/Skk
Antti Tuokkola	TIEH/Hky
Timo Sääski	Finnmap Oy
Juha Rätty	Finnmap Oy (siht.).

Tutkimuksen suunnitteluun ja suoritukseen ovat lisäksi osallistuneet Tomas Ray Finnmap Oy:stä ja Kari Olkkonen Geoditech Oy:stä. Raportin laativat Tomas Ray ja Timo Sääski. Raportin viimeisteli Penelope Sala (TIEH/Hky).

Helsinki, joulukuu 1992

Helsingin tuotantotekninen kehitysyksikkö



## TIIVISTELMÄ

Tutkimuksen **tavoitteena** oli testata ja kokeilla servo-ohjatun takymetrin soveltuvuutta **liikkuvan koneen paikantamiseen**. Samassa yhteydessä testattiin kojeen käyttöominaisuuksia "yhden miehen" mittauslaitteena perinteisen takymetrimittauksen korvaajana kartoitus- ja merkintätöissä sekä testattiin kojeen runkomittausominaisuuksia. Raporttiin on liitetty myös selostus videokuvaukseen perustuvasta paikantamisjärjestelmästä.

Tutkimus kuuluu osana tielaitoksen projektiin, jossa pyritään hyödyntämään tiesuunnittelusta saatava numeerinen tieto sekä yhdistämään se tierakennustyömaan työkoneiden automaattiseen ohjaamiseen.

Servotakymetri pystyy seuraamaan liikkuvaa kohdetta kiihdytyksissä, käännöksissä, suunnanvaihdossa ja pysähdyksissä nopeuden ollessa alle 15 km/h. Pylväät eivät katkaise seurantaa, mutta 0,5 m:iä leveämmät esteet ja kasvillisuus aiheuttavat seurannan keskeytyksen. Keskeytyksen jälkeen työkone on pysäytettävä seurannan uudelleen aloittamista varten keskimäärin 15 sekunniksi. Liikkuvan kohteen seurantaan vaikutti prismayksikkö, jota tulisi kehittää liikkuvan kohteen paikantamiseen paremmin soveltuvaksi.

Takymetrin **tarkkuus**, kun kohde liikkuu, riippuu erityisesti kohteen nopeudesta. Nopeuden ollessa noin 3 km/h on korkeuden mittaustarkkuus **keskim. 2 cm** ja nopeuden ollessa noin 8 km/h on mittaustarkkuus vastaavasti keskim. **7 cm**. Tämän lisäksi myös yksittäisten virrehavaintojen määrä kasvoi nopeuden lisääntyessä. Nopeuden ollessa 3 km/h korkeusmittauksen **maksimivirhe** oli noin **10 cm** ja 8 km/h vastaavasti noin **20 cm**.

Myös **paikannustiheys** (x, y, z rekist.) riippuu kohteen nopeudesta. Paikannustiheys oli 3 km/h nopeudessa **0,5 m** ja 8 km/h matkassa **4,1 m**. Liikkuvan kohteen seurantamittauksen tasotarkkuutta (xy-taso) ei testattu.

Koneen suunta ja nopeus on laskettava peräkkäisistä sijainnin havainnoista. Koneen asento (kierrot) jää tuntemattomaksi ja edellyttää näin ollen takymetrin lisäksi muita havaintojärjestelmiä. Takymetrijärjestelmän tiedonsiirtoyhteydet ovat paikannus-sovellusta ajatellen hyvät.

Testin perusteella saadut korkeustarkkuustulokset osoittavat, että servotakymetrin **paikannustarkkuuden arvioidaan riittävän** ainakin **tienrakentamisen karkeisiin työvaiheisiin** alhaisilla nopeuksilla (alle 5 km/h). Toisaalta testituloksien vertaaminen on vaikeata, koska nykymenetelmillä saavutettavia tienrakentamisen tarkkuuksia ei tunneta.

Testatun takymetrin hinta on 250.000 - 300.000 mk. Takymetrijärjestelmän käyttö onnistuu lyhyen koulutuksen jälkeen. Virheikäytön estämiseksi on järjestelmän käyttöä ohjattava ja valvottava asiantuntijan toimesta.

## SAMMANFATTNING

Syftet med undersökningen var att utreda om ett mätsystem som är baserat på en servostyrd takymeter, kan användas för positionering av en vägbyggnadsmaskin i rörelse. Samtidigt värderades servotakymetersystemets egenskaper för inmätning, utsättning och stommätning.

Undersökningen är en del av vägverkets projekt för utnyttjande av numerisk vägplansdata vid automatisk styrning av vägbyggnadsmaskiner.

Positioneringen av en maskin i acceleration, svängar, byte av körriktning och start/stopp fungerar bra i hastigheter under 15 km/h. Stolpar bryter inte kontakten mellan servotakymetern och maskinen, men kontakten bryts av sikthinder som är bredare än 0.5 m. Efter att positioneringen brutits, bör maskinen stoppas för en nyetablering av positioneringen. Nyetableringen räcker ca 15 s. Under försöket försvårades positioneringen avsevärt av att den reflektorenhet som användes, inte lämpar sig för positionering av ett objekt i rörelse. För att systemet skall lämpa sig för positionering av objekt i rörelse bör reflektorenheten utvecklas.

Positioneringens noggrannhet för ett objekt i rörelse är beror på objektets hastighet. Medelfelet för positioneringen i höjdlid (z) var för hastigheten 3 km/h 2 cm och för hastigheten 8 km/h 7 cm. När hastigheten ökade, ökade också antalet grova felmätningar. Positioneringens maxfel i höjdlid var för hastigheten 3 km/h ca. 10 cm och för hastigheten 8 km/h ca. 20 cm. Positioneringens noggrannhet i planled (xy) undersöktes inte.

Positioneringsintervallet (x,y,z regist.) är beror också på objektets hastighet. Registreringsintervallet är vid en hastighet av 3 km/h 0.5 m och vid en hastighet av 8 km/h 4.1 m.

Servotakymetersystemet kan användas för att bestämma maskinens position, men maskinens läge (vridning) förblir obekant. Maskinens riktning och hastighet kan beräknas från två påvarandra följande positioneringar. För en absolut positionering, var också maskinens läge bestäms, krävs ett tillägs-system för lägesbestämningen.

På basen av undersökningen anses servotakymetersystemets positionerings noggrannhet vid låga hastigheter (under 5 km/h) vara tillräcklig, för att systemet skall kunna användas vid mätningar för byggandet av de grövre vägsikten.

Priset för det undersökta servotakymetersystemet rör sig mellan 250.000 - 300.000 mk. Mätsystemet är lätt att använda efter en kort skolningsperiod. Även om systemet är lätt att använda bör en person som är insatt i geodetiskmätning utveckla arbetsmetoder för positioneringen, samt övervaka användningen av systemet.



## SUMMARY

Object of this study was to test and experiment suitability of a servo-driven tacheometer for navigating mobile machine. In addition characteristics of the instrument as so called "one man" survey system in normal setting out and detail survey were experimented. Also capability of the instrument in control surveys was tested. This report also includes description of a navigation system based on video imagery.

Finnish National Road Administration has started a project, where an attempt is made to utilize digital data from road design in automatic controlling of road construction machinery. This report forms one part of the project.

Servo tacheometer is able to follow target during accelerations, turns, forward-reverse operations and stops up to speed of 15 kms/h. Normal poles don't interrupt tracking, but obstacles and vegetation wider than 0.5 m cause an interruption. After interruption the machine has to be stopped for an average of 15 seconds to re-start tracking. Tracking of moving target was affected by the reflector unit, which should be developed more suitable for locating moving target.

Accuracy of the tacheometer, when target is moving, specially correlates with speed of the target. With speed of appr. 3 kms/h accuracy of height measurement is 2 cms as an average. Speed being appr. 8 kms/h accuracy of height measurement is correspondingly 7 cms. In addition to this, number of blunders increased with higher speeds. Speed being 3 kms/h maximum error of height measurement was appr. 10 cms and with speed 8 kms/h it was appr. 20 cms.

Also location interval (x,y,z registration) correlates with target speed. It was 0.5 m with speed of 3 kms/h and 4.1 m with speed of 8 kms/h. Planimetric accuracy of tracking was not tested.

Direction and speed of a machine has to be calculated from successive locations. Axis rotations of the machine remain unknown and determination of them requires additional sensors. Data communication capabilities of the tacheometer are well suited for navigation.

Experimented height accuracies in the test indicate servo tacheometer to be suitable for machine control in rough construction work at least with low speeds (below 5 kms/h). On the other hand we are missing reference data from conventional methods, which makes comparison difficult.

Price of the tested tacheometer is between 250.000 - 300.00 Fmk. Short training is needed for successful operation of the system. To eliminate mistakes in use, the system requires expert control and guidance.

## Sisältö

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>7</b>
1.1 Tutkimuksen tausta	7
1.2 Tutkimuksen tavoitteet	7
1.3 Tutkimuksen järjestelyt	8
1.4 Keskeisten termien määrittelyt	9
<b>2 SERVO-OHJATTU TAKYMETRI</b>	<b>11</b>
2.1 Geodimeter System 4000	11
2.2 Järjestelmän toiminta liikkuvan kohteen mittauksissa	13
<b>3 TUTKIMUSMENETELMÄT JA -TULOKSET</b>	<b>14</b>
3.1 Sektoroinnin vaikutus hakuun ja haun aikamenekkiin	14
3.2 Liikkeessä olevan heijastimen seuranta	15
3.3 Näköesteiden vaikutus seurantamittaukseen	18
3.4 Ajonopeuden vaikutus korkeudenmittaustarkkuuteen	20
3.5 Liikkuvan kohteen korkeudenmittaustarkkuus	21
3.6 Servokohdistuksen tarkkuus	25
3.7 Takymetrin runkomittaustarkkuus	26
3.8 "Yhden miehen järjestelmän" tehokkuuden arviointi kartoitus- ja merkintämittauksissa	28
<b>4 YHTEENVETO</b>	<b>31</b>
4.1 Järjestelmän käyttö	31
4.2 Seurantamittaus	31
4.3 Paikantamistarkkuus	32
4.4 Paikantamistiheys	32
4.5 Tiedonsiirto	33
4.6 Havaitut ongelmakohdat	33
4.7 Muut raportit	33
4.8 Jatkotoimenpiteet	34
<b>5 VIDEOPAIKANTAMINEN</b>	<b>34</b>
5.1 Yleistä	34
5.2 Paikannus eteenpäin leikkaamalla	35
5.3 Paikannus taaksepäin leikkaamalla	35
5.4 Fotogrammetrisen mittausjärjestelmän edut	37
5.5 Fotogrammetrisen mittausjärjestelmän ongelmakohdat	38
5.6 Yhteenveto	38



---

KIRJALLISUUSLUETTELO

39

---

LIITTEET

1. Servo-ohjattujen takymetrien teknisiä tietoja
2. Resinatestin eri ajokertojen mitattu korkeus referenssin suhteen
3. Testin kannalta tärkeimpien tierakenteiden tarkkuusvaatimukset
4. "Yhden miehen järjestelmän" vertailussa kartoitettu alue
5. Maahantuojan lausunto Geodimeter 4000 käytöstä työko-  
neiden ohjauksessa
6. VTT:n raportti; Ajoneuvo- ja työkonepaikannus servo-  
ohjattua takymetriä ja merkintälaskua käyttäen
7. Testituloksien laskennassa käytetyt kaavat

## 1 JOHDANTO

### 1.1 Tutkimuksen tausta

Vuonna 1991 valmistui Tielaitoksen selvitys "Mittausautomaation hyödyntäminen maarakennuskoneiden ohjauksessa" (TIEL 3200035). Työkoneiden ohjausautomaatiolla voidaan parantaa työvaiheiden laatua, nopeuttaa itse työvaiheen suoritusta sekä saavuttaa kustannussäästöjä työvaiheita karsimalla ja materiaalisäästöillä.

Em. selvityksessä oli esitetty paikanmäärittämis- ja niiden soveltuvuutta työkoneiden ohjaukseen. Tiesuunnittelusta saatavan numeerisen tiedon tehokas hyödyntäminen edellyttää työkoneen terän kolmiulotteisen sijainnin (XYZ-koordinaattien) tuntemista. Tämä tieto tarvitaan reaaliajassa ja riittävällä tarkkuudella, jotta terää voidaan ohjata automaattisesti tai puoliautomaattisesti. Tällä tekniikalla pystytään ohjaamaan työkoneita ilman maastoon tehtäviä kiinteitä apumerkintöjä, ja lopputuotteena pyritään saavuttamaan tiesuunnitelman mukaiset tavoitepinnat korkeudessa ja tasossa.

Edellä esitetyn selvityksen perusteella arvioitiin servo-ohjattuun takymetriin perustuvan paikannustekniikan olevan lähinnä käytännön toteutusta kolmiulotteisena paikannusjärjestelmänä. Laitteen ominaisuuksia ja tarkkuuskäyttäytymistä liikkuvan kohteen paikantamisessa ei oltu kuitenkaan tutkittu, joten oli perusteltua selvittää laitteen käyttökelpoisuus sekä mahdolliset kehitysmahdollisuudet tällaiseksi järjestelmäksi.

Testausta varten tutkittiin markkinoilla olevat servo-ohjatut takymetrit. Markkinoilla olevat laitteet ja niiden tekniset tiedot on esitetty liitteissä 1a - 1c. Testi päätettiin suorittaa GEODIMETER SYSTEM 4000 -laitteistolla, jossa oli ainoana takymetrinä automaattinen heijastimen etsintätoiminto, joka on välttämätön liikkuvan kohteen paikannuksessa. Laitteisto on varsinaisesti tarkoitettu "yhden miehen" suorittamaan kartoitukseen, joten testiä varten laitteistoa jouduttiin osittain itse rakentamaan.

Servo-ohjatun takymetrin tarkkuustutkimuksen lisäksi etsittiin myös korvaavia paikannusjärjestelmiä. Mielenkiintoisen, aikaisemmin tutkimatta jääneen vaihtoehdon tarjoaa videokuvaukseen perustuvat järjestelmät. Tämän tekniikan edelläkävijä on suomalainen MAPVISION-järjestelmä.

### 1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Käyttötestin tavoitteena oli selvittää soveltuuko servo-ohjattu takymetri teknisesti liikkuvan työkoneen paikannusjärjestelmäksi sekä selvittää sen käyttömahdollisuuksia tielaitoksen muissa mittauksissa. Tavoitteena oli tutkia, päästäänkö tarvittavaan alle 10 cm absoluuttiseen tasotarkkuuteen ja alle 3 cm korkeustarkkuuteen reaaliajassa, kun seurataan liikkuvaa kohdetta.



Oleellista oli myös paikallistaa mahdolliset ongelma-alueet sekä selvittää tarvitseeko ja voidaanko laitteen ominaisuuksia kehittää. Testeissä ei tavoiteltu tilastollista varmuutta testattujen tekijöiden suhteen.

Lisäksi haluttiin verrata servo-ohjatun takymetrin tehokkuutta ja tarkkuutta perinteisiin takymetri-mittausjärjestelmiin sekä ideoida uusi videokuvaukseen perustuva paikannusjärjestelmä.

### 1.3 Tutkimuksen järjestelyt

Servo-ohjatun takymetrin alustava testaus suoritettiin Hyrylässä hiekkakentällä 9. ja 11.6.1992. Tutkimusta varten rakennettiin henkilöautoon kiinnitys servo-ohjatun takymetrin heijastinosaa RPU:ta varten (kuva 1). Sää oli molempina päivinä tuulinen, puolipilvinen ja lämpötila oli  $+15^{\circ}\text{C}$ .



Kuva 1. RPU-yksikkö kiinnitettiin testausta varten henkilöauton kattotelineeseen.  
Picture 1. During the test, the RPU-unit was attached to a roof rack.



Runkomittausominaisuudet testattiin 12.6.1992 Tampereen teknillisen korkeakoulun testikentällä Hervannassa. Mittauksissa käytettiin korkeakoulun keskistysnastoja sekä normaalia runkomittauskalustoa. Mittaukset suoritti Timo Soini Finnmap Oy:stä. Sää oli puolipilvinen ja lämpötila oli +16°C.

Servo-ohjatun takymetrin tarkkuustesti suoritettiin 7.8.92 Hyvinkään ratapihalla kiskotestinä. Heijastinosa oli kiinnitetty resiinaan (kuva 2). Sää oli tuulinen, pilvinen ja lämpötila oli +17°C.



Kuva 2. Korkeuden mittaustarkkuuden määrittämiseksi RPU-yksikkö kiinnitettiin resiinaan.

Picture 2. For testing of height measuring accuracy, the RPU-unit was attached to a handcar.

Kartoitus- ja merkintäominaisuudet testattiin Geoditech Oy:n parkkipaikalla ja sen lähiympäristössä Espoossa 17.8.1992. Sää oli aurinkoinen ja lämpötila oli +21°C.

Testaukseen osallistuivat Finnmap Oy:stä Tomas Ray ja Timo Sääski sekä Geoditech Oy:stä Kari Olkkonen ja Matti Tammi. Osaa testeistä seurasivat myös Tielaitokset edustajina Matti Laitinen ja Antti Tuokkola.

#### 1.4 Keskeisten termien määrittelyt

Osa tekstissä esiintyvistä termeistä on selvyyden vuoksi määritelty. Lista ei ole kattava.

##### ASEMAPISTE:

- Piste tai paikka, johon takymetri pystytetään.



- Jos kyseessä on koordinaateiltaan tunnettu piste, puhutaan tunnetusta asemapistestä. Vrt. vapaa asemapiste.

#### AUTOMAATTINEN SEURANTA:

- Mittaustila, jossa seuranta-järjestelmä (käytetään myös nimeä TRACKER-järjestelmä) huolehtii automaattisesti heijastimen seurannasta.
- Ohjauskäskyt välitetään servomootoreille.

#### ENSIHAKU:

- Toiminto (napin painallus), jolla heijastinyksiköstä (RPU:sta) lähetetään käsky takymetrille heijastinyksikön etsimistä ja mittausyhteyden luomista varten. Takymetri haravoi järjestelmällisesti määritellyn mittaussektorin.

#### RPU:

- Servo-ohjatun takymetrijärjestelmän heijastinyksikkö, joka koostuu heijastimesta (prisma), TRACKERIN ohjauslinssistä, radiolähtimestä ja tietokoneyksiköstä.

#### KOJEEN TASAUS:

- Toimenpide, jolla kojeen pystyakseli asetetaan paikallisen luotiviivan (painovoimavektori) kanssa yhdensuuntaiseksi.

#### LIITOSPISTE:

- Orientoinnissa käytettävä koordinaateiltaan tunnettu piste, johon tehdään asemapisteeltä suunta ja etäisyyshavainto.

#### ORIENTOINTI:

- Toimenpide, jolla mittaukset liitetään käytettävään koordinaattijärjestelmään.
- Sisältää kojeen tasauksen ja liitospistemittaukset.

#### SEKTOROINTI:

- Toimenpide, jolla voidaan määrittää hakualueen suuruus. Heijastimen haku tapahtuu vain sektoroidulta alueelta, seurantamittaus toimii myös mittaussektorin ulkopuolella.

#### SEURANNAN KATKO/MITTAUSKATKO:

- Mittausyhteys takymetrin ja heijastinyksikön välillä katkeaa väliaikaisesti (palautuu laitteiston toimesta).

#### TOTAALIKATKOS:

- Mittausyhteys takymetrin ja heijastinyksikön välillä katkeaa kokonaan. Yhteys ei palaudu ilman ensihaku-toimintoa.

#### TRACKER-TOIMINTO:

- Sama toiminto kuin AUTOMAATTINEN SEURANTA. TRACKER-järjestelmä hoitaa heijastimen automaattisen seurannan.

#### TRK-ETÄISYYDENMITTAUS:

- Jatkuva etäisyydenmittaus-tila.
- Mittaus tapahtuu jatkuvana ilman erityistä mittauskäskeyä heti, kun signaali heijastuu takaisin heijastimesta.

#### TYÖKONE:

- Tiemateriaaleja tasaava ja levittävä kone.
- Testeissä tutkittu käyttöä lähinnä tiehöylän paikantamisessa, mutta periaate on hyödynnettävissä myös kaivinkoneissa ja vastaavissa tietyömaalla liikkuvissa työkoneissa.

#### UUSINTAHAKU:

- Sama toiminto kuin ENSIHAKU, mutta nopeampi. Käytetään, kun takymetri on kadottanut yhteyden RPU-yksikköön. Takymetri käyttää RPU:n etsimisessä hyväksi siihen saatua viimeistä havaintoa.

#### VAPAA ASEMAPISTE

- Takymetri pystytetään mittausten kannalta parhaaseen paikkaan (ei monumentoitua pistettä).
- Orientointi suoritetaan vähintään kahden tunnetun pisteen avulla. Vrt. asemapistet.

## 2 SERVO-OHJATTU TAKYMETRI

### 2.1 Geodimeter System 4000

Takymetri on kulmien ja etäisyyksien mittalaite, jossa yleensä on laskentaohjelmisto ja kaksisuuntainen tiedonsiirtojärjestelmä mikrotietokonetta varten. Takymetrillä voidaan määrittää mitattavan kohteen x-, y- ja z-koordinaatit.

Servo-ohjattu takymetri ei poikkea mittausteknisesti normaalista takymetristä. Ero on siinä, että servo-ohjatussa takymetrissä ihmisen suorittama kääntöliike tehdään servomootoreilla. Markkinoilla on ollut jo 70-luvulta asti



servo-ohjattuja laitteita. 90-luvun tekniikkaa edustavat servo-ohjatut takymetrit, jotka automaattisesti seuraavat heijastinta ja löytävät heijastimen itsenäisesti pelkällä hakukäskyllä.

GEODIMETER SYSTEM 4000 on ruotsalaisen Geotronics Ab:n kehittämä ja Geoditech Oy:n maahantuoma servo-ohjattu takymetrimittausjärjestelmä. Järjestelmä on tarkoitettu "yhden miehen" mittausjärjestelmäksi (one man system). Järjestelmä koostuu kahdesta osasta; servotakymetristä ja RPU-heijastinyksiköstä (RPU = Remote Positioning Unit). Kuvassa 3 on esitetty laitteen eri yksiköt.



Kuva 3. Oikealla servotakymetri ja vasemmalla liikuteltava RPU-heijastinyksikkö.  
Picture 3. Servo tachymeter on the right and movable RPU-reflector unit on the left.

RPU-yksikkö koostuu prismasta, TRACKERIN ohjauslinssistä, radiolähettimestä ja tietokoneyksiköstä. Radioyhteyden johdosta voidaan itse koje jättää miehittämättä. Järjestelmän toimintaa ohjataan heijastinpäästä. Kaksisuuntaisen tiedonsiirron avulla heijastinpäästä voidaan lähettää mittaus- ja tallennuskomentoja kojeelle. Vastaavasti mitattu koordinaattitieto saadaan välittömästi myös heijastinpäähän.

Koje on tarkoitettu varsinaisesti kartoitus- ja merkintämittauksiin. Kartoitus- ja merkintämittauksiin on tähän saakka aina tarvittu vähintään kaksi henkilöä. Nyt servomoottori korvaa kojemiehen. Menetelmän etuja on myös se, että työn suoritus rekisteröintineen ja mitatun tiedon koodauksineen siirtyy itse mittauskohteeseen heijastinpäähän, jolloin työn laatu paranee.

Mittaustoiminnan ohjaus heijastinpäässä mahdollistaa perinteisten takymetrimittausten lisäksi järjestelmän käytön liikkuvan koneen paikannukseen. Miehittämätön takymetri voidaan sijoittaa tunnetulle tai vapaalle asemapais-



teelle rakennetavan tieosuuden varrelle. Sijoittamalla heijastinosa liikkuvaan koneeseen saadaan koneen (heijastimen) taso- ja korkeuskoordinaatit reaaliajassa käyttöön.

Testissä käytetty laite vastasi kunnoltaan normaalikäytössä olevaa mittauslaitetta. Testitakymetriä ei valmisteltu mitenkään erityisesti testiä varten. Testatun laitteen sarjanumero on 4400 10115 ja laite on Geoditech Oy:n omistama.

## 2.2 Järjestelmän toiminta liikkuvan kohteen mittauksissa

Järjestelmän toimintaperiaate on yksinkertainen. Ennen varsinaisen paikannusmittauksen alkua joudutaan kojepäässä suorittamaan valmistelevia mittauksia järjestelmän saamiseksi koordinaatistoon. Kaaviossa 1 on esitetty järjestelmän vaatimat mittausvalmistelut sekä eri vaiheisiin tarvittava tieto ennen kohteiden mittaamisen aloittamista.

### *Kaavio 1.*

*GEODIMETER SYSTEM 4000 mittausjärjestelmän mittausvalmistelut ja eri vaiheiden toteuttamiseen tarvittava tieto.*

TOIMENPIDE	TARVITTAVA TIETO
Pystytys Keskistys Tasaus	Lämpötila ja ilmanpaine
Radioyhteys RPU:hun	Käytettävä kanava
Takymetrin orientointi	Lähtöpisteiden koordinaatit
Sektorointi	Työskentelyalue
RPU:n aktivointi	
X-, Y- ja Z-koordinaattien mittaus	

Koje pystytetään joko tunnetulle tai vapaalle asemapisteele. Koje keskistetään ja tasataan normaalisti. Hienotasausta varten on kojeessa kaksiakselinen elektroninen putkitasain, mikä nopeuttaa tasausta tavalliseen yksiakseliseen putkitasaimen verrattuna.

Takymetriin syötetään lämpötila ja ilmanpaine (etäisyysmittauksen säätökorjauksia varten) sekä luodaan radioyhteys takymetrin ja RPU-yksikön väliin.

Takymetri orientoidaan suorittamalla tarvittavat liitoshavainnot RPU-yksiköllä (1-2 liitospistettä, riippuen onko kyseessä vapaa- tai tunnettu asemapiste). Takymetrin ohjelmisto suorittaa orientoinnin laskennan havaitujen pisteiden vaaka- ja pystykulman sekä vinoetäisyyden avulla. Käyttäjä

voi tuloksia tarkastelemalla ja tarkistusmittauksella tarkistaa orientoinnin onnistumisen.

Hakutoimintaa voidaan nopeuttaa pienentämällä työskentelyaluetta sektoroimalla. Näiden toimenpiteiden jälkeen ei kojepäässä enää tarvita miehitystä, vaan toimintaa voidaan ohjata RPU-yksiköstä käsin. Se aktivoidaan (virta päälle + valitaan mittaustoiminta) ja sen heijastin suunnataan kohti takymetriä. Hakukäsky annetaan napinpainalluksella. Mittausyhteyden muodostuminen näkyy mittaustulosten ilmestymisenä RPU-yksikön näytöllä.

Valitsemalla näytettäväksi suureiksi x-, y- ja z-koordinaatit ja jatkuva seurantaus (TRK-mittaus), voidaan järjestelmää soveltaa liikkuvan koneen reaaliaikaiseksi paikantamisjärjestelmäksi. Liikuttamalla RPU-yksikköä ja säilyttämällä mittausyhteys (heijastin suunnattu takymetriin) nähdään näytössä heijastimen koordinaatit.

### 3 TUTKIMUSMENETELMÄT JA -TULOKSET

#### 3.1 Sektoroinnin vaikutus hakuun ja haun aikamenekkiin

Testin tavoite:

- selvittää RPU:n ja takymetrin välisen mittaus/seurantayhteyden luomiseen kuluva aika sekä ensihaussa että uusintahaussa.
- tutkia onnistuuko haku liikkuvaan kohteeseen.
- selvittää miten paljon mittausalueen sektorointi nopeuttaa hakua em. tilanteissa.
- saada kuva aikaviiveistä ja järjestelmän "toimivuudesta" liikkuvan kohteen tapauksessa.

Testijärjestelyt:

Testipaikkana oli Hyrylän sorakuoppa. Takymetri sijoitettiin siten, että kolmeen eri suuntaan oli mahdollista mitata vapaasti yli 300 m. Testi suoritettiin neljällä eri sektoroinnilla ja jokaisessa sektorissa neljällä eri etäisyydellä. Jokaisella etäisyydellä suoritettiin "ensihaku" ja viisi "uusintahakua". Kaikki haut tehtiin pysäytettyyn ajoneuvoon.

Hakuaika mitattiin siten, että "ensihaussa" kello käynnistettiin kun "hakukäsky" annettiin ja pysäytettiin, kun pisteen koordinaatit näkyivät RPU:n näytössä. "Uusintahaussa" aikaa otettiin siten että yhteys katkaistiin tahallaan (totaalikatko) ja kello käynnistettiin uudella "hakukäskyllä". Kello pysäytettiin kun pisteen koordinaatit näkyivät RPU:n näytössä.



Testitulokset:

Taulukossa 1 esitetään "hakuajan" yhteys etäisyyteen ja sektorointiin, kun RPU on paikallaan.

*Taulukko 1. Hakuajat eri etäisyyksillä (ensihaku/uusintahaku).*

*Table 1. Scan times with various distances (first scan/re-scan)*

Sektori	noin 10 m (s)	noin 100 m (s)	noin 300 m (s)
360	18/10	58/57	30/10
180	19/14	13/13	15/15
90	11/11	9/11	11/11
40	9/9	9/8	9/10

Testin perusteella voidaan todeta, että

- pieni mittaussektori nopeuttaa hakua huomattavasti, kuitenkin sekä "ensihaku" että "uusintahaku" kestää tietyömaatyypisellä alueella yli 10 s.
- etäisyys ei vaikuta hakuaikaan. 180 sektorilla on hakuaika alle 300 m:n etäisyydellä keskim. 15 s, ja 40 sektorilla vastaavasti alle 300 m:n matkalla keskim. 10 s.
- "ensihaku" ja "uusintahaku" vaativat aina, että ajoneuvo on paikallaan haun ajan. Haku ei onnistu liikkuvaan kohteeseen.

### 3.2 Liikkeessä olevan heijastimen seuranta

Testin tavoite:

- kokeilla miten liikkeessä olevan RPU:n seuranta onnistuu käännoksissa, pysähdyksissä ja suunnanvaihtoissa,
- selvittää, kuinka helposti ja kuinka paljon mittauskatkoja ja totaalikatkoja syntyy.

Testijärjestelyt:

Testipaikkana oli Hyrylän sorakuoppa. RPU:n kohdistus kohti takymetriä hoidettiin käsivaraisesti auton sisältä.

Testi koostui kahdesta osasta; pujottelukokeesta ja suunnanvaihtokokeesta. Molemmat kokeet ajettiin neljällä eri nopeudella (5, 10, n.12, 15 km/h). Nopeudet mitattiin auton nopeusmittarilla.

Pujottelukoe muodostui autonrenkaista rakennetun radan kiertämisestä. Toistot pyrittiin ajamaan samoja ajolinjoja pitkin.



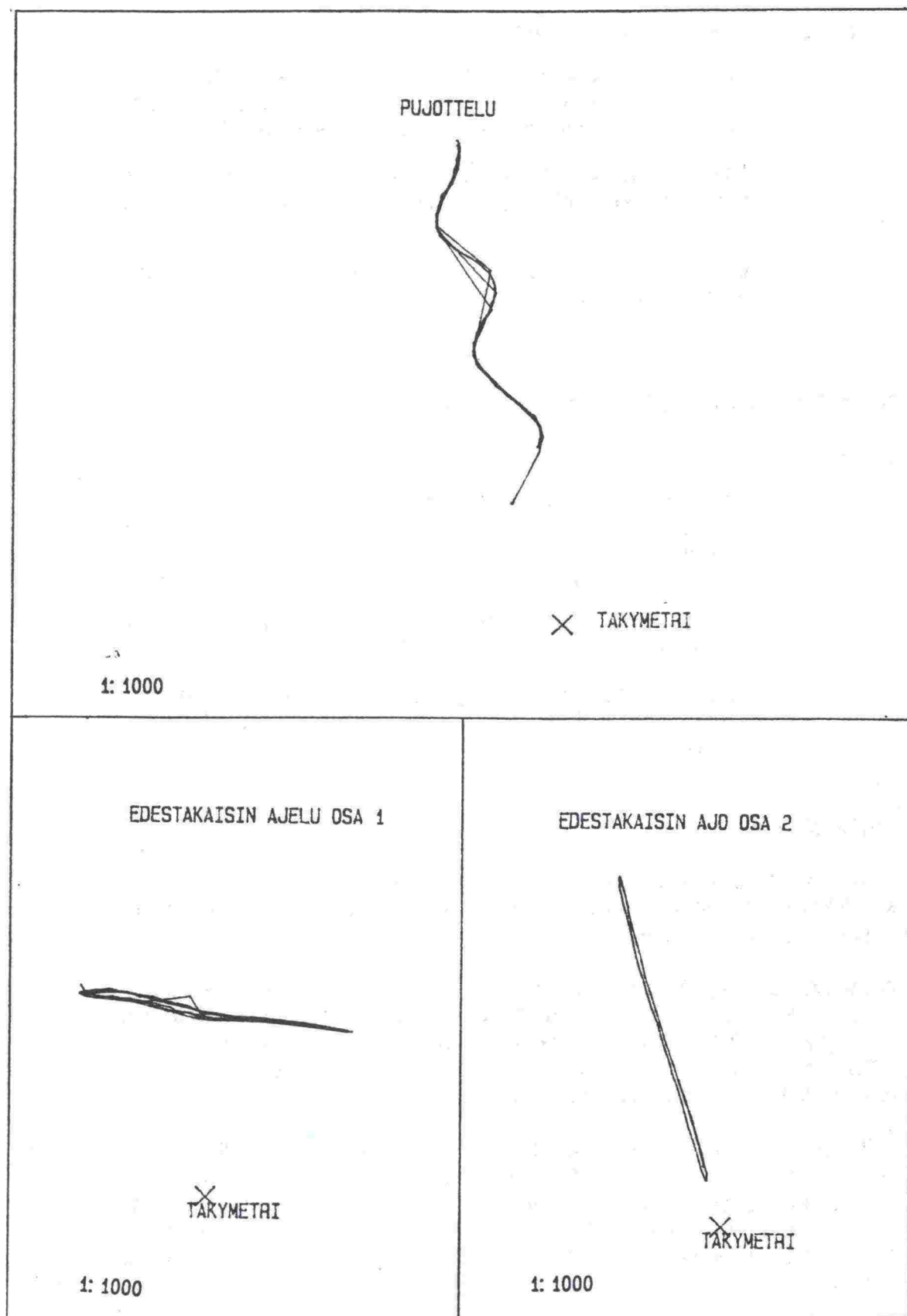
Suunnanvaihtokokeessa ajettiin kahta eri suoraa ajolinjaa edestakaisin. Toinen ajolinjoista kulki suoraan takymetriä kohti, toinen oli 90:een kulmassa poikittain takymetriin nähden.

Etäisyydet takymetrin ja RPU:n välillä vaihtelivat molemmissa kokeissa 20 - 150 m välillä. Seurannan onnistumista seurattiin rekisteröimällä ajetun ajoreitin koordinaatit.

#### Testitulokset:

Kuvassa 4a ovat pujottelukokeen tulokset. RPU:n käsisuuntaus aiheutti ongelmia. Suuntausta ei pystytty säilyttämään riittävän tarkasti kaikissa mutkissa, mikä näkyikin ajoreittien tulosteissa, joissa yhteys on katkennut aina samassa mutkassa. Yhteyden katkeaminen johtui nimeenomaan käsisuuntauksen epäonnistumisesta eikä takymetrin seurantamittauksen epäonnistumisesta.

Kuvissa 4b ja 4c ovat suunnanvaihtokokeen tulokset. Tulosteista selviää, että mittauksissa ei ole tullut katkoja. Testeissä ei ole pyritty ajamaan samoja ajoreittejä.



Kuva 4. Seurantatestin ajoreittien tulosteet.  
Picture 4. Vehicle routes in tracking test.

Testin perusteella voidaan todeta, että

- takymetrin ja RPU:n välinen mittausyhteys säilyy (ts. seurantamittaus toimii) kiihdytyksissä, käännoksissä, suunnanvaihdoksissa ja pysähdyksissä nopeuden ollessa alle 15 km/h.
- kriittisiä alueita mahdollisille katkoille ovat takymetrin ohittaminen läheltä sekä heijastinyksikön ja takymetrin välissä olevat esteet.
- liikkuvan koneen paikantaminen vaatii ehdottomasti paremman heijastimen, esimerkiksi puolipalloheijastimen tai useamman heijastimen asettamisen kehälle.

### 3.3 Näköesteiden vaikutus seurantamittaukseen

Testin tavoite:

- tutkia esteiden vaikutusta seurantamittaukseen ja saada yleiskuva tietyömaalla mahdollisesti esiintyvien esteiden vaikutuksesta seurantamittauksiin; minkälainen este aiheuttaa mittauskatkon, minkälainen este aiheuttaa totaalikatkon.
- selvittää, vaikuttaako kulkusuunnan esteen takainen muutos seurantaan.
- selvittää, miten pitkään takymetrin ja RPU:n välinen mittausyhteys voi ajallisesti olla katkaistuna ilman, että tapahtuu totaalikatko.

Testijärjestelyt:

Testipaikkana oli Hyrylän sorakuoppa ja Geoditech Oy:n piha-alue Espoossa. RPU:ta kuljetettiin sekä henkilöautolla (kiinnitetty kattotelineeseen, suuntaus sisältä) että jalkaisin erilaisten esteiden takaa.

Ajoneuvotestissä esteet koostuivat liikennemerkkeistä, valopylväistä, rakenteista sekä puiden ja pensaiden muodostamasta kasvillisuudesta. Esteiden ja takymetrin väliset etäisyydet vaihtelivat 50 - 100 m:iin sekä esteiden ja RPU:n väliset etäisyydet 2 - 10 m:iin. Kokeen aikana käytettiin 180 sektointia. RPU:hun rekisteröitiin kulkureitti.

Jalkatestissä mitattiin, kuinka kauan RPU voi olla esteen takana ilman, että seurantayhteys katkeaa. RPU:ta kuljetettiin jalkaisin esteiden takaa. Liikesuunta ja nopeus esteen takana pyrittiin pitämään vakiona. Esteen muodostaman "katvealueen" rajat määritettiin etukäteen ja merkittiin maahan. Etäisyys esteestä takymetriin oli 15 - 40 m ja esteestä RPU:hun 2 - 10 m.

RPU:n katveessaoloaika mitattiin siten, että kello käynnistettiin, kun RPU ylitti etukäteen merkityn rajan ja pysäytettiin, kun RPU:n näyttöön saatiin



taas koordinaatit. Katveessaoloaikaa kasvatettiin 0.5 sek välein, kunnes seurantamittaus katkesi (totaalikatko). Toistoja tehtiin 4 kpl.

#### Testitulokset:

Ajoneuvotestissä esteiden vaikutusta arvioitiin subjektiivisesti niiden aiheuttamien katkoksen perusteella.

Taulukossa 2 on esitetty yhteenveto aikatestauksen tuloksista eri katveajoilla.

*Taulukko 2. Katveessaoloajan vaikutus totaalikatkoon.*

*Table 2. Relation between duration of blind angle and total interruption.*

Katveen pituus (sek)	Seurantamittaus jatkuu (= ei katkoksia)
0,5	OK
1	OK
1,5	OK
2	Katkeaa
2,5	Katkeaa

Testin perusteella voidaan todeta, että

- erilaiset pylväät (liikennemerkkit, valaisinpylväät ja puiden rungot) eivät katkaise seurantaa, jos vain seurattava kohde on jatkuvasti liikkeessä
- yli 0,5 m leveämmät rakenteet aiheuttavat seurannan katkoksen kaikissa ajonopeuksissa. Katkoksen jälkeen liikkuvan RPU:n löytäminen onnistuu, jos nopeus on enintään 5 km/h ja este alle 10 metriä. Jos ajoneuvon nopeus tai este on suurempi, on ajoneuvo pysäytettävä "uusintahaun" ajaksi
- liikesuunnan vaihto esteen takana ei vaikuta seurantamittauksen jatkumiseen tai hakuaikojen pituuteen
- kasvillisuus (pensaat ja puun oksat) katkaisevat helposti seurantamittauksen aiheuttaen mittauskatkon tai totaalisen katkoksen, lehtipuut ovat pahimpia
- esteen koko ei suoraan vaikuta totaalikatkoon vaan aika, jonka RPU on katveessa. Pienikin este voi aiheuttaa totaalikatkon, jos se on servotakymetrin tai RPU-yksikön välittömässä läheisyydessä
- vaikka takymetri etsii kadonnutta heijastinta lähes 10 sekuntia, niin liikkuva heijastin ei saa olla katveessa yli 1,5 sekuntia.

### 3.4 Ajonopeuden vaikutus korkeudenmittaustarkkuuteen

Testin tavoite:

- selvittää, onko mittausjärjestelmän korkeudenmittaustarkkuus liikkuvan kohteen paikantamisessa riippuvainen ajonopeudesta ja korkeuden vaihteluista.

Testijärjestelyt:

Testipaikkana oli Hyrylän sorakuopan laidalla oleva kestopäälystetty kevyenliikenteen väylä. Ajettu matka oli n. 90 m ja suurin korkeusero 4.4 m. Testissä ajettiin takymetriä kohti.

Referenssiajolinja mitattiin noin 4 m:n välein. RPU oli kiinnitettynä auton kattotelineeseen, ja auto pysäytettiin pisteen kohdalle mittauksen ajaksi.

Seurantamittauksia tehtiin 4:llä eri nopeudella, yksi ajokerta kutakin nopeutta kohti. Kaikki mitatut RPU:n koordinaatit (xyz) rekisteröitiin mikrotietokoneelle. Koordinaattien lisäksi tallennettiin myös koordinaattien rekisteröintiaika.

Testin tulokset:

Taulukossa 3 on esitetty eri nopeuksilla ajettujen pituusleikkauksien tulokset referenssiajolinjaan verrattuna. Taulukossa oleva ajonopeus on laskettu koordinaattien rekisteröintiajan ja ajatun matkan perusteella.

Taulukko 3. Ajonopeuden vaikutus mittaustarkkuuteen ja rekisteröintivälimatkaan.  
 Table 3. Relation between vehicle speed, measuring accuracy and registration interval.

Nopeus (km/h)	Keskim. XYZ- tallennusväli (s) (m)	Ajettu matka (m)	Pisteitä (kpl)	Korkeus- poikkeama (cm)
8	1,5 3,458	100,28	29	max 10 keskim. 2
11	1,4 4,322	90,75	21	max 38 keskim. 5
14	1,6 6,173	74,07	12	max 10 keskim. 8
17	1,4 5,986	95,77	16	max 36 keskim. 10

Testitulosten perusteella voidaan todeta, että:

- liikkuvan kohteen korkeudenmittaustarkkuus riippuu nopeudesta. Tarkkuus heikkenee nopeuden kasvaessa.



- testiradan kaltevuus (n. 5 %) ei vaikuttanut liikkuvan kohteen korkeudenmittaustarkkuuteen eikä aiheuttanut ylimääräisiä katkoja.
- testituloksiin vaikuttivat auton jousitus, värinä ja osittain eri ajoreitti, joten testin perusteella ei voida arvioida luotettavasti järjestelmän korkeudenmittaustarkkuutta.

### 3.5 Liikkuvan kohteen korkeudenmittaustarkkuus

Testin tavoite:

- selvittää liikkuvan kohteen absoluuttinen korkeudenmittaustarkkuus (järjestelmän sisäinen tarkkuus). Tarkoituksena oli täydentää edellisessä kappaleessa esitettyä testiä.
- saada varmuus, että järjestelmän korkeusmittaustarkkuus riittää tietyömaaolosuhteisiin.

Testijärjestelyt:

Testipaikkana oli Hyvinkään ratapiha. Käytössä olleen resiinan etupäähän kiinnitettiin kaksi miniprismaa ja RPU (kuva 5 seuraavalla sivulla). Takymetri pystytettiin siten, että ajo tapahtui suoraan takymetriä kohti ja takymetristä poispäin. Tämä siitä syystä ettei RPU:n kohdalla esiintyisi kohdistamisvaikeuksia ja siitä johtuvia mittauskatkoja.

Referenssikorkeudet mitattiin noin 4 metrin välein. Kulmat havaittiin yhdessä kojeasennossa ja matka STD-kertamittaus-toiminnolla.

Liikkuvan kohteen eli resiinan mittaus suoritettiin takymetrin ollessa servo-ohjauksen varassa TRK-jatkuvamittaus-toiminnolla. Resiinalla ajettiin eri nopeuksilla takymetriä kohti tai siitä poispäin. Koordinaattien lisäksi tallennettiin myös koordinaattien rekisteröintiäika.

Testiajoja tehtiin 13 kpl.



Kuva 5. Resiinaan kiinnitetyt miniprismat ja RPU.

Picture 5. Mini-prisms and the RPU-unit attached to a handcar.

## Testitulokset:

Taulukossa 4 sekä kuvissa 6 ja 7 sekä liitteessä 2 (a-m) on kuvattu mittaus-tarkkuutta ja havainnollistettu sitä käytännön olosuhteisiin. Ajonopeus on laskettu koordinaattien rekisteröintiajan ja kuljetun matkan perusteella.

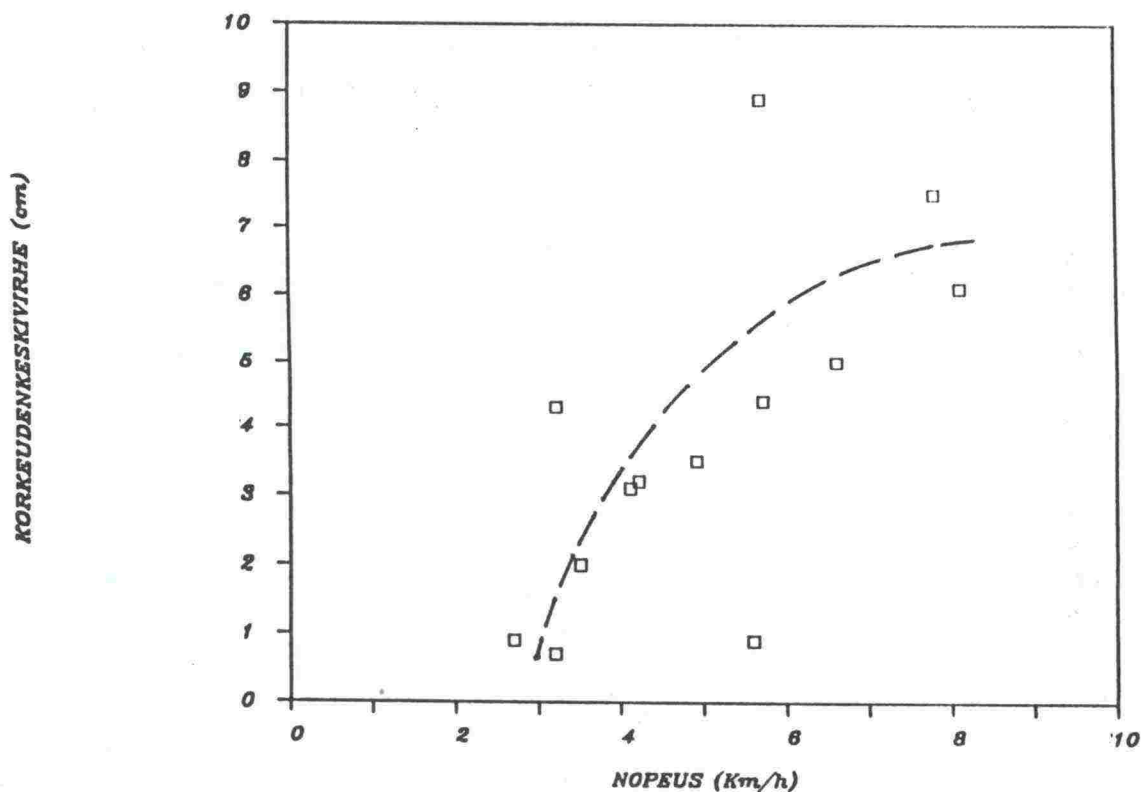
Taulukko 4. Korkeudenmittauksen keskivirhe ajonopeuden suhteen.

Table 4. Relation between mean error of height measurement and vehicle speed.

Ajo	Takymetri Kohti/Pois (K tai P)	Ajettu matka (m)	Keski nopeus (km/h)	Havaintoväli Aika/Matka (s)/(m)	Korkeuden virheet		
					Keskiarvo (cm)	Keskivirhe (cm)	Maksim (cm)
1	K	114.84	3.2	0.51/0.45	-1.0	4.3	40.2
2	P	116.63	2.7	0.61/0.47	-0.4	0.9	4.7
3	K	72.67	3.2	0.95/0.84	-0.6	0.7	2.8
4	P	94.46	3.5	1.13/1.11	1.2	2.0	11.7
5	K	114.86	4.1	1.22/1.38	-2.1	3.1	11.3
6	P	114.78	4.2	1.5 /1.74	1.7	3.2	11.5
7	K	114.70	4.9	1.47/2.01	-2.8	3.5	9.1
8	P	115.81	5.7	1.52/2.41	2.8	4.4	14.1
9	K	112.87	5.7	1.61/2.56	-6.0	8.9	28.3
10	P	107.33	6.6	1.64/2.98	3.7	5.0	12.7
11	K	109.15	5.6	1.89/2.95	-6.5	8.8	28.3
12	K	112.13	8.1	1.85/4.15	-5.0	6.1	13.7
13	P	112.52	7.8	1.73/3.75	5.4	7.5	21.1

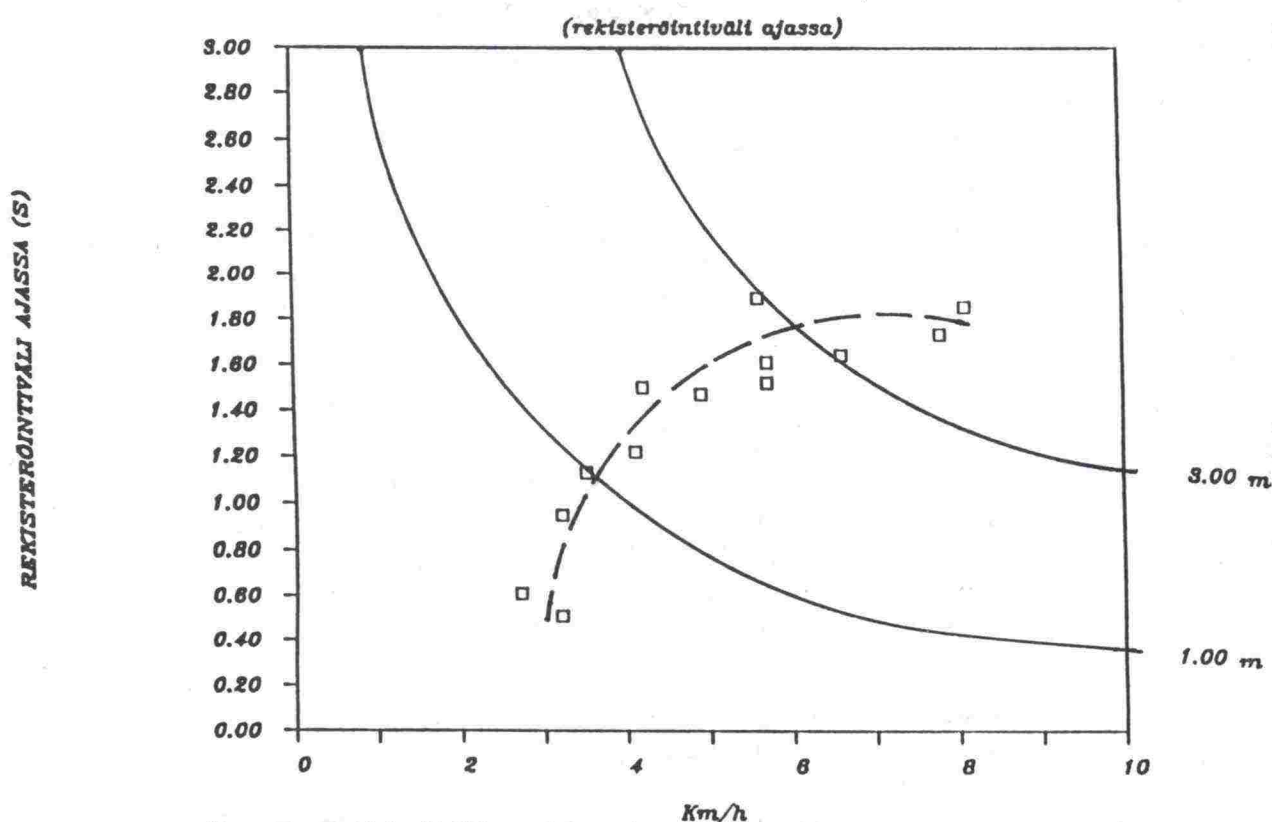


# KORKEUDENTARKKUUS / NOPEUS

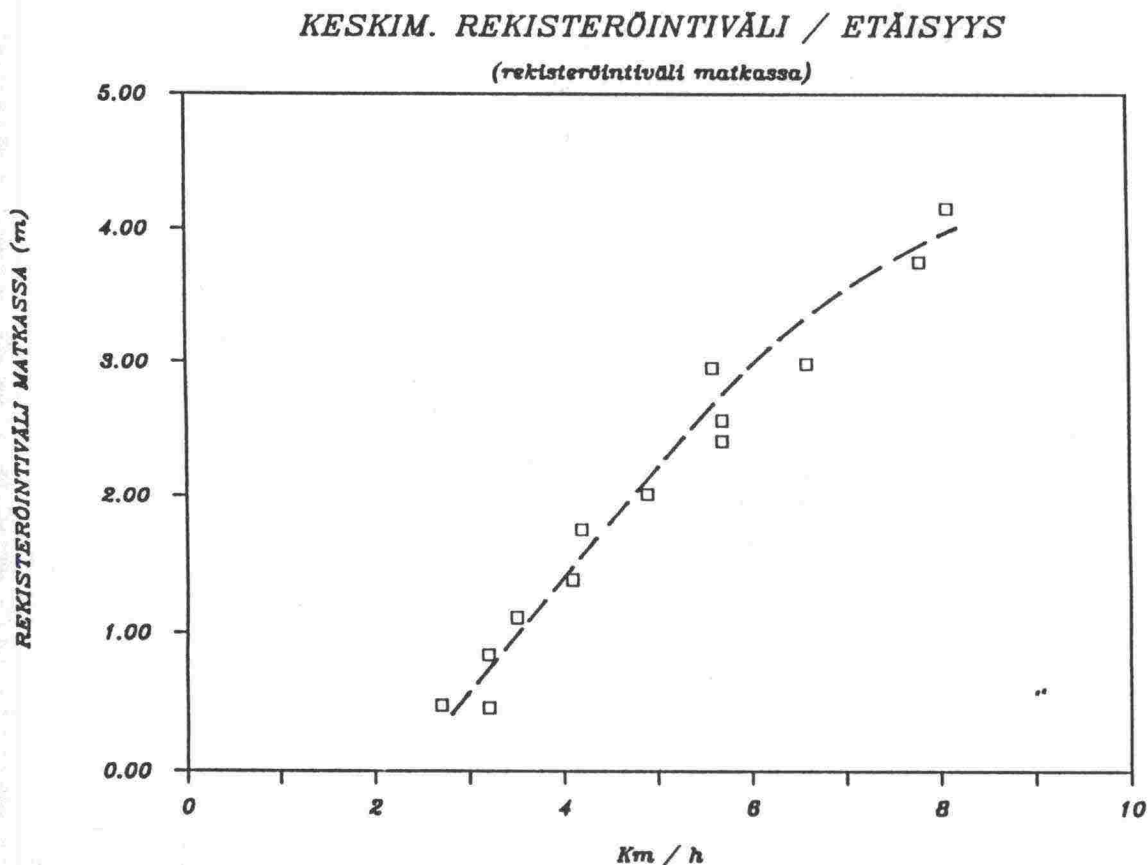


Kuva 6. Korkeudenmittauksen keskivirhe ajonopeuden suhteen.  
Picture 6. Relation between mean error of height measurement and vehicle speed.

# KESKIM. REKISTERÖINTIVÄLI / NOPEUS



Kuva 7a. Rekisteröintiä jaksossa nopeuden suhteen.  
Picture 7a. Relation between registration interval (time) and vehicle speed.



Kuva 7b. Rekisteröintiäiheys (matkassa) nopeuden suhteen.

Picture 7b. Relation between registration interval (distance) and vehicle speed.

Testituloksien perusteella voidaan todeta, että

- liikkuvan kohteen korkeudenmittaustarkkuus huononee nopeuden kasvaessa. Hiljaisilla nopeuksilla korkeuden keski-  
virheet täyttävät asetetut tarkkuusvaatimukset. Yli 5 km/h  
ajonopeuksilla mittaustulosten keski-  
virheet (hajonta) kasvavat liian suuriksi. Testin kannalta tärkeimpien tierakenteiden  
tarkkuusvaatimukset on esitetty liitteessä 3.
- liikkuvan kohteen korkeudenmittaustarkkuus ei riipu ajosuun-  
nasta takymetriin nähden.
- järjestelmän korkeudenmittauksessa esiintyy systemaattista  
virhettä. Kohteen liikkuessa takymetriä kohti on kohteen  
mitattu korkeus todellista korkeutta pienempi, ja kohteen liik-  
kuessa takymetristä poispäin on mitattu korkeus todellista  
korkeutta suurempi
- mittaustarkkuus on riippuvainen matkasta. Järjestelmän  
korkeudenmittauksessa esiintyvä systemaattinen virhe on  
suurimmillaan takymetrin läheisyydessä. Kaikissa ajoissa  
korkeudenmittauksen virhe oli pienempi kuin 5 cm mitta-  
matkan ollessa yli 60 m (ks. liite 2). Kun etäisyys takymetrin  
ja RPU:n välillä oli alle 60 m, kasvoi virheen suuruus eksp-



nentiaalisesti siten, että maksimivirhe (n. 5 cm nopeuden ollessa 3 km/h, 20 cm nopeuden ollessa 8 km/h) oli 3-4 metrin päässä takymetristä. Tämä korostui nopeuksien kasvaessa. Epätarkkuudet johtuvat ilmeisesti servon nopeammista liikkeistä takymetrin lähellä.

- ajonopeuden kasvaessa kasvaa myös sijainnin (x, y, z) rekisteröinnin aikaväli. Lyhin rekisteröintiväli oli ajettaessa nopeudella 3 km/h, jolloin rekisteröintiväli oli 0,5 s (0,5 m matkassa). Pisin rekisteröintiväli oli ajettaessa nopeudella 8 km/h, jolloin rekisteröintiväli oli 1,9 s (matkassa 4,1 m). Syitä tallenusvälin aikavaihteluihin ei saatu selvitettyä.

### 3.6 Servokohdistuksen tarkkuus

Testin tavoite:

- selvittää paikallaan olevan kohteen seurantamittauksen absoluuttinen taso- ja korkeudenmittaustarkkuus sekä selvittää takymetrin servomoottoreiden kohdistustarkkuus.

Testijärjestelyt:

Mittaustarkkuutta testattiin Tampereen teknillisen korkeakoulun testikentällä Hervannassa. Testi suoritettiin mittaamalla testikentällä olevia tarkasti tunnettuja tihennyspisteitä sekä automaattisesti kohdistuen (RPU:hun) että vertailun vuoksi manuaalisesti kohdistuen (miniprismaan).

Havainnot tehtiin yhdeltä asemapisteltä ja käytetyt mittausetäisyydet vaihtelivat 5 - 30 m:iin. Korkeuserot olivat suurimmillaan n. 2 m. Molemmilla menetelmillä mitattiin 9 pistettä (tihennyspisteet 10 - 53, ks. kuva 8).

Etäisyydenmittaus tehtiin TRK-jatkuvamittaus-tilassa, jolloin mittaus vastasi liikkuvan kohteen mittauksessa käytettävää mittaustapaa. Miniprismamittaus tehtiin STD- kertamittaus -toiminnolla. Molemmilla menetelmillä mitattuja koordinaatteja verrattiin tihennyspisteiden tunnettuihin Mecometrillä määritettyihin koordinaatteihin.

Testin tulokset:

Taulukossa 6 on esitetty koordinaattieroista lasketut taso- ja korkeuserot millimetreinä. Dxy kuvaa erovektorin suuruutta tasossa ja dz korkeudessa. Korkeusmittaustarkkuus on paikallaan olevaan prismaan erittäin hyvä.

*Taulukko 6. Servomootoreilla tehdyn kohdistuksen ja käsin tehdyn kohdistuksen erot tunnettuihin koordinaatteihin.*

*Table 6. Differences from servo driven and manual fine tunings to the known coordinates.*

		dxy	dz
RPU (autom. kohd.)	max	12 mm	2 mm
	keskiarvo	8 mm	0 mm
	keskivirhe	9 mm	1 mm
Miniprisma (man.kohd.)	max	13 mm	4 mm
	keskiarvo	7 mm	0 mm
	keskivirhe	8 mm	2 mm

Testin perusteella voidaan todeta, että:

- servomootorin ohjaama seurantamittaus paikallaan olevaan kohteeseen on yhtä tarkka kuin manuaalinen takymetrimittaus.
- paikallaan olevan kohteen mittaustarkkuus sekä tasossa että korkeudessa riittää hyvin tietyömaamittauksiin, koska epätarkkuudet automaattisella kohdistuksella ovat alle 1 cm.

### 3.7 Takymetrin runkomittaustarkkuus

Testin tavoite:

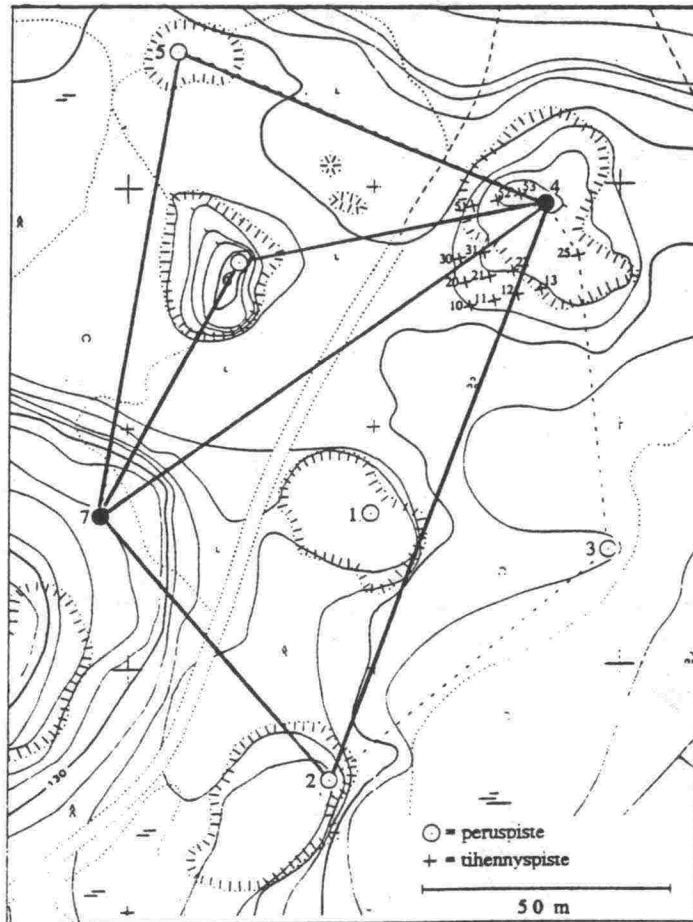
- testata takymetrin runkomittaustarkkuus ja käytännön toimivuus sekä selvittää servo-ohjatun takymetrin käytännöllisyys runkomittaustoissa.

Testijärjestelyt:

Runkomittaustesti suoritettiin Tampereen teknillisen korkeakoulun testikentällä Hervannassa. Tarkkuuden osalta testi oli järjestelmäkalibroinnin tyyppinen. Sääolot ja työskentelynopeus vastasivat normaalia tuotantoympäristöä, jolloin laskennasta saatuja tarkkuuksia voidaan arvioida todellisina työmaalla saavutettavina mittausten tarkkuuksina. Absoluuttiset kulma- ja etäisyysmittaustarkkuudet selviävät vain laboratoriossa tehtävässä kokekalibroinnissa.

Testissä tehtiin havaintoja kahdella asemapisteellä (pisteet 4 ja 7) siten, että kultakin asemapisteeltä havaittiin 4 liitospistettä. Testikenttä ja mitatut pisteet selviävät kuvasta 8.





Kuva 8. Hervannan testikenttä.  
Picture 8. Geodetic test field in Hervanta.

Havainnot tehtiin käyttämällä 4 täyttä sarjaa siten, että vaaka- ja pystykulma sekä etäisyydet havaittiin erikseen. Sää testipäivänä oli aurinkoinen ja lämmin ja mittauksia häiritsi hieman ilman väreily. Laskennassa käytettiin asemapisteitä kiinteinä pisteinä.

#### Testitulokset:

Mittaukset on takymetrimittauksen tarkkuuslukujen osalta laskettu Tampereen teknillisen korkeakoulun Geodesian ja fotogrammetrian laitoksella. Mittausjärjestelmän kalibroinnin tulokset ovat seuraavat:

- yhden suuntakulman keskivirhe 0.78 mgon
- yhden pystykulman keskivirhe 0.31 mgon
- vaakakulmien I ja II asentojen erojen puolikkaiden keskiarvo -0.5 mgon
- indeksivirheiden keskiarvot -0.5 mgon
- nollapistevirhe 0.8 mm.

Havaittu runkoverkko laskettiin myös TEKLA:n runkolaskenta-ohjelmistolla. Tämän laskennan tulokset koordinaattien osalta on esitetty taulukossa 7.

*Taulukko 7. Runkomittaustestin laskentatulokset koordinaattien osalta.*  
*Table 7. Results of the control survey test in coordinate form.*

Piste	Koordinaattikeskivirheet (mm)			Erot tunnettuihin arvoihin (mm)		
	mx	my	mz	dx	dy	dz
2	0,0	0,0	2,0	-1,0	3,0	-4,0
5	0,0	0,0	2,0	-1,0	-1,0	-1,0
6	0,0	0,0	1,0	-2,0	1,0	-3,0

Servotakymetrin mahdollistamaa automaatiota (automaattinen putken kääntö ympäri ja seuraavan liitospisteen haku) kokeiltiin mittauksien yhteydessä. Automaatio ei näissä olosuhteissa tarjonnut mitään merkittäviä etuja pisteiden löytymisessä, koska liitospisteiden paikat olivat selvät ja tähyksien löytäminen helppoa.

Mittauksissa kokeiltiin myös takymetrin sisäistä runkomittausohjelmaa. Ohjelman käyttö ja servo-ohjaus nopeuttivat mittausprosessin etenemistä huomattavasti.

Testin perusteella voidaan todeta, että:

- servotakymetrin mittaustarkkuus on ainakin tämän testin perusteella riittävän hyvä IV-luokan runkomittauksiin.
- servo-ohjauksen tuoma hyöty (putken automaattinen kääntö) ei ollut merkittävä tässä mittauksessa. Olosuhteissa, joissa liitospisteiden löytäminen on hankalaa ja osa mittausajasta kuluu tähyksien etsimiseen, on automatiikasta apua.
- laitteen runkomittausohjelmalla suoritettu havaintojen tallennus nopeuttaa mittausprosessia.

### 3.8 "Yhden miehen järjestelmän" tehokkuuden arviointi kartoitus- ja merkintämittauksissa

Testin tavoite:

- verrata "yhden miehen järjestelmän" tehokkuutta kartoituksen ja maastoonmerkinnän osalta tavanomaiseen takymetrin takaa tapahtuvaan mittaukseen.



#### Testijärjestelyt:

Mittaukset suoritettiin Geoditech Oy:n pihamaalla. Kaikki mittaukset tehtiin GEODIMETER SYSTEM 4000 - takymetrillä yhdeltä asemapisteltä.

Kartoituksen tehokkuutta arvioitiin siten, että 45 min aikana suoritettiin kartoitus seurantamittauksena RPU:n avulla (yksi mies) ja tämän jälkeen kartoitusta jatkettiin tavanomaisena takymetrikartoituksena (kaksi miestä). Yhden miehen järjestelmää käytettäessä pisteiden tallennus tapahtuu RPU:hun. Tavanomaisessa takymetrikartoituksessa pisteet tallennettiin takymetrin sisäiseen muistiin. Kartoituksen tulostus on liitteessä 3. Alue on rakennettua puistoaluetta.

Maastoonmerkinnän tehokkuutta arvioitaessa käytettiin kartoitusmittauksessa rekisteröityjä koordinaatteja, joita merkattiin maastoon kummallakin menetelmällä minuutin ajan. Merkinnän tavoitetarkkuutena käytettiin xy-tasossa 3 cm:ä. Mitään paaluja eikä varsinaisia tiesuunnittelun merkintäohjelmia käytetty.

#### Testitulokset:

Käytetyt työajat eivät sisällä kojeiden pystyttämistä, orientointia eikä muita mittaustyön valmisteluun kuuluvia työvaiheita.

Kartoituksen osalta saavutettiin seuraavat pistemäärät (kartoitetut xyz, 45 min):

- |   |              |
|---|--------------|
| - RPU + servotakymetri (1 kartoittaja):                 | 85 pistettä  |
| - perinteinen takymetri<br>(1 kartoittaja + 1 apumies): | 85 pistettä. |

Kartoituksessa ei servo-ohjattu mittaus lisännyt työn tehokkuutta. Säästöt tulevat palkkakustannuksissa. Käytettäessä servotakymetriä yhden miehen järjestelmänä vaikuttavat hakuajat ja esteet mittauksien tehokkuuteen aivan samalla tavalla kuten liikkuvan kohteen paikannukseen (ks. luvut 3.1 - 3.3). Kasvillisuus saattaa siten muodostaa suuren ongelman käytettäessä yhden miehen järjestelmää esim. metsämaastossa.

Maastoonmerkinnän osalta saavutettiin seuraavat pistemäärät (maastoon merkityt xyz, 25 min):

- |   |              |
|---|--------------|
| - RPU + servotakymetri (1 kartoittaja):                 | 30 pistettä. |
| - perinteinen takymetri<br>(1 kartoittaja + 1 apumies): | 25 pistettä. |

Näiden kahden mittausjärjestelmän taloudellinen vertailu ilman servo-ohjatun takymetrin todellisia käyttökokemuksia ja -kustannuksia pidemmältä ajanjaksolta on mahdotonta. Alla olevassa esimerkissä (esim. 1) on karkea arvio mittausjärjestelmien käyttökuluista.

## Esimerkki 1.

- Servotakymetrin käyttökulut verrattuna tavanomaiseen takymetriin yhden vuoden aikana. Esimerkissä on oletettu seuraavaa:
- molemmilla kojeilla on sama käyttöaste (ts. yhtä kestävät)
- molemmissa kojeissa on käytössä samat maastomittausohjelmistot (esim. GT-ohjelma)
- kojeiden hankintakustannuksien kuoletusaika on 3 vuotta ja poistot ovat tasapoistoja.

	Servotakymetri h. 270.000 mk	Tavall. takymetri h. 150.000 mk
Kiinteät kulut (poistot)	90.000 mk	50.000 mk
Huoltosopimus takymetri tallennin	10.500 mk )	3.800 mk 2.000 mk
Maastomittaus- ohjelman ylläpito- sopimus	2.500 mk	2.500 mk
Mittaushenkilökunta (palkka + sotu)		
- kojemies	170.000 mk	170.000 mk
- apumies	-----	120.000 mk
YHTEENSÄ	273.000 mk	348.300 mk

\*) Huoltosopimusjärjestelmää ei toistaiseksi ole käytössä; hinta on laskettu saman osuuden mukaan kuin tavanomaisessa takymetrissä.

Tämän esimerkin perusteella servotakymetriyhmän kulut olisivat yhden vuoden aikana 75.000 mk pienemmät kuin tavanomaisen takymetriyhmän kulut.

Testin perusteella voidaan todeta, että:

- kartoituksessa ei päästä tehokkaampaan mittaukseen, säästöä saavutetaan kuitenkin palkkakustannuksissa.
- tielaitoksen kartoitusmittaukset suoritetaan pääsääntöisesti peitteisessä maastossa, jolloin esteet (etenkin lehtipuut) vaikeuttavat oleellisesti servo-ohjattua mittausta.



- merkintämittauksissa päästään testin perusteella n. 20 % suurempaan työsaavutukseen. Tehokkuus saavutetaan sillä, että kartoittaja näkee heijastinpäässä koko ajan erot tavoite-mittoihin, jolloin hän voi reagoida niihin välittömästi.
- tielaitoksen merkintämittaukset suoritetaan pääsääntöisesti avoimessa maastossa, jolloin esteet eivät haittaa tehokasta mittausta. Tällöin servo-ohjatun takymetrin käyttö on perusteltua. Testatussa servotakymetrimallissa ei ollut tielaitoksen maastoonmerkintää ajatellen parasta mahdollista merkintäohjelmistoa. Merkintä on tehokkainta, jos mittauksessa voidaan hyödyntää tielaitoksen merkintätyöhön erityisesti suunniteltua maastomittausohjelmistoa.
- mittausten suorittaminen prismapäässä parantaa mittausten laatua. Yleensä paremmin koulutettu mittaaja on kojeen takana. Servo-ohjattu takymetri mahdollistaa mittauksen johtamisen ja tiedon koodauksen itse mittauskohteessa.

## 4 YHTEENVETO

### 4.1 Järjestelmän käyttö

Servo-ohjatun mittausjärjestelmän käyttö on helppoa. Koulutuksen ja hyvin suunnitellun laadunvalvontarutiinien turvin pystyy kuka tahansa käyttämään mittausjärjestelmää. Servotakymetrin pystytys ja mittausvalmistelut eivät vie enempää aikaa kuin tavanomaisen takymetrin pystytys. Servotakymetrin huollontarve ja säänkestävyys on valmistajan mukaan sama kuin tavanomaisella takymetrillä. Työskentely- ja laadunvalvontarutiinien kehittämiseen, mittaustoiminnan valvontaan ja mittausjärjestelmän ylläpitoon tarvitaan kuitenkin asiantuntija.

### 4.2 Seurantamittaus

Servo-ohjatun takymetrin kyky seurata liikkeessä olevaa heijastinta on ratkaiseva tekijä työkonen tehokkaan ja toiminnaltaan mielekkään paikannusjärjestelmän kannalta. Testattu mittausjärjestelmä kykenee seuraamaan liikkuvaa työkonetta avoimessa maastossa kiihdytyksissä, käännöksissä, suunnanvaihtoissa ja pysähdyksissä nopeuden ollessa alle 15 km/h. Myöskään testeissä käytetyt kaltevuudet (n. 5 %) eivät vaikuttaneet seurantaan.

Seurantamittausta rajoittavat maastossa esiintyvät näköesteet. Pylväät eivät katkaise seurantaa, mutta 0,5 m leveämmät esteet tai kasvillisuus katkaisee seurannan. Jos liikkuvan ajoneuvon nopeus on alle 5 km/h ja este on pienempi kuin 10 m, pystyy takymetri löytämään kohteen uudelleen vauhdissa seurantatatkoksen jälkeen. Jos käytettävä nopeus on suurempi kuin 5 km/h, on ajoneuvo pysäytettävä uuden seurantayhteyden luomiseksi. Yhteyden saaminen työkonen pysähdyttyä kestää käytetystä työaluesektorista riippuen keskimäärin 15 s.

Käytännön paikantamista varten täytyy ajoneuvossa olevaa heijastinosaa kehittää sellaiseksi, että mittaussyhteys siihen varmasti säilytetään kaikissa ajotilanteissa. Ratkaisuna voisi olla esim. useamman prisman asettaminen kehälle. Oleellista on, että mittausten tarkkuus ei saa huonontua.

### 4.3 Paikantamistarkkuus

Testin perusteella servo-ohjattu takymetri pystyy korkeudenmittauksessa paikantamaan liikkuvan kohteen  $\pm 5$  cm:n tarkkuudella nopeuden ollessa alle 10 km/h. Korkeudenmittaustarkkuus huononee nopeuden kasvaessa. Nopeuden ollessa noin 3 km/h on korkeudenmittauksen keskivirhe noin 2 cm ja vastaavasti nopeuden ollessa noin 8 km/h on korkeudenmittauksen keskivirhe noin 7 cm.

Suurimmat virheet paikantamisessa esiintyivät takymetrin läheisyydessä mittaamatkojen ollessa alle 60 m. Tällöin korkeusmittauksessa esiintyi yksittäisiä virhemittauksia, jotka olivat 3 km/h nopeudella noin  $\pm 10$  cm ja 8 km/h nopeudella  $\pm 20$  cm. Testin perusteella saadut korkeustarkkuustulokset osoittavat, että servotakymetrin paikannustarkkuus riittää ainakin alhaisilla nopeuksilla (alle 5 km/h). Toisaalta testituloksien vertaaminen on vaikeaa, koska nyky menetelmillä saavutettavia tarkkuuksia ei tunneta.

Liikkuvan kohteen seurantamittauksen tasotarkkuutta (xy-taso) ei testattu. Liikkuvan kohteen tasotarkkuuden luotettavaa ja riittävän tarkkaa testimenetelmää ei resurssien puutteen vuoksi pystytty kehittämään. Tasomittaustarkkuus on kuitenkin teoriassa vähintään yhtä hyvä kuin korkeusmittaustarkkuus.

Liikkuvan kohteen paikantamisen suurin virhelähde on takymetrin servoja ohjaavan TRACKERI. Trackeri huolehtii siitä, että takymetri seuraa liikkuvaa RPU:ta tietyllä toleranssilla. Trackerin toiminnasta ja tarkkuudesta ei laitevalmistaja anna tietoja. Trackeri ei kuitenkaan seuraa liikkuvaa kohdetta 100 %:sti. Tämän huomaa erityisesti absoluuttisen korkeusmittaustarkkuuden testistä (kiskotesti). TRACKERI-järjestelmän tutkiminen ja kehittäminen on valmistajan toimesta tarkoin salattua, joten järjestelmän toimintaperiaatteeseen ei voitu tutustua.

### 4.4 Paikantamistiheys

Liikkuvan työkonen paikantamisen tosiaikaisuuden kannalta on koneen paikantamistiheydellä suuri merkitys. Servotakymetri-järjestelmä pystyy paikantamaan liikkuvan kohteen keskimäärin 2 metrin (1,5 s) välein ajonopeuden ollessa alle 10 km/h.

Paikantamistiheys (x, y, z rekist.) on riippuvainen ajonopeudesta. Havaintoväli oli noin 3 km/h nopeudella 0,5 s (matkassa 0,5 m) ja noin 8 km/h nopeudella 1,9 s (matkassa 4,1 m).

Sijainnin rekisteröintitiheys on riippuvainen xyz-koordinaattien laskentaan tarvittavien kulmien ja etäisyyslukemien rekisteröinnin synkronoinnista.



Synkronoinnilla tarkoitetaan sitä, että takymetri valitsee minkä kulman havainnon se yhdistää mihinkin etäisyyshavaintoon. Synkronointi aiheuttaa aikaviivettä, ja jos halutaan paikantaa kohteen sijaintia tiheämmin, on tätä kulmien ja matkojen synkronointia kehitettävä.

#### 4.5 Tiedonsiirto

Testatun mittausjärjestelmän tiedonsiirtorutiinit ovat riittävän monipuoliset mahdollisen työkoneen paikantamis- ja ohjausjärjestelmää ajatellen. Takymetriä voi täysin ohjata ja valvoa RPU:ssa olevan radiolinkin avulla. Myös paikantamistiedon molemman suuntainen siirto ja purku on mahdollista RPU:n radiolinkin kautta.

Paikantamistiheyden aikavälit on rekisteröity ulkopuolisella tietokoneella RS232-portin kautta. Tämä merkitsee sitä, että tämä on se todellinen tiheys, jolla servotakymetrin mittausjärjestelmä pystyy syöttämään paikantamistietoa ulkopuoliselle ohjausjärjestelmälle.

#### 4.6 Havaitut ongelmakohdat

Yksi servotakymetriyksikkö pystyy kerrallaan paikantamaan ainoastaan yhden työkoneen. Työmaalla useampi servotakymetrijärjestelmä pystyy kuitenkin samanaikaisesti toimimaan omalla mittaustaajuudellaan.

Servotakymetrin mittausjärjestelmä pystyy määrittämään ainoastaan yhden pisteen prisman x, y, z -koordinaatit, ja koneen suunta ja nopeus on laskettava peräkkäisistä sijainnin havainnoista. Koneen asento (kierrot) jää tuntemattomaksi ja asennon määrittämiseksi tarvitaan lisämittausjärjestelmä.

Toimiakseen mittausjärjestelmä vaatii esteettömän näkyvyyden takymetrin ja prisman välillä. Suurempi näköeste aiheuttaa paikantamisen seurantayhteydessä totaalikatkon ja työkone on pysäytettävä uuden yhteyden luomiseksi.

Testikäytössä ollut prismayksikkö ei sovellu liikkuvan kohteen paikantamiseen.

Testatun servo-ohjatun takymetrin mittausjärjestelmän hinta on varsin korkea. Tämä johtuu osittain siitä, että tutkitun järjestelmän ominaisuudet ovat huomattavasti laajemmat kuin mitä liikkuvan kohteen paikantamiseen vaaditaan.

#### 4.7 Muut raportit

Geoditech Oy on antanut oman lausunnon testin tuloksista. (liite 4). Raporttiin on liitetty myös VTT:n Sähkö- ja automaatiotekniikan laboratorion servo-ohjattuun takymetriin perustuvan tasopaikannusmenetelmän esittely (liite 5).

#### 4.8 Jatkotoimenpiteet

Servo-ohjattu takymetri-mittausjärjestelmä on kehityskelpoinen työkoneen paikantamisjärjestelmäksi. Testattu servo-ohjattu takymetrijärjestelmä vaatii kuitenkin paremman heijastinyksikön kehittämistä. Lisäksi on työkoneen absoluuttista paikantamista varten ratkaistava miten havaitaan työkoneen asento (kierrot). Jotta saavutetut testitulokset korkeustarkkuuden suhteen voitaisiin arvioida, on ensin selvittävä nyky menetelmillä saavutettavat tarkkuudet.

Mahdollisissa jatkotutkimuksissa servo-ohjatun takymetrijärjestelmän käytöstä työkoneen paikantamisessa tulisi:

- tutkia, riittääkö yhden pisteen mittaus ohjausjärjestelmän toteuttamiseen ja mitä rinnakkaismenetelmiä voitaisiin käyttää useamman pisteen mittauksiin
- selvittää uudet heijastinratkaisut; esimerkiksi useampi prisma ympyräkehälle, jolloin mittausyhteys säilyy kaikissa ajotilanteissa
- selvittää laitevalmistajan kiinnostus ja mahdollisuudet laitteiston kehitykseen, esim. mahdollisuus kehittää "riisuttu" ja halvempi malli
- seurata servo-ohjattujen takymetrien kehitystä myös muun merkkisten laitteiden osalta
- seurata mahdollisia ulkomaisia servo-ohjattujen takymetri-paikannusjärjestelmien kehitysprojekteja ja tarjota yhteistyötä tarvittaessa.

### 5 VIDEOPAIKANTAMINEN

#### 5.1 Yleistä

Videopaikantamisessa kamera on joko sijainniltaan tunnetulla pisteellä ja kuvaa työkoneita (paikannus eteenpäin leikkaamalla) tai kamera on liikkuvassa työkoneessa ja kuvaa tienvarressa olevia kiintopisteille asennettuja tähyksiä (paikannus taaksepäin leikkaamalla).

Ajoneuvon paikantamiseen "suurella tarkkuudella" (tarkkuus parempi kuin 5 cm) tarkoitettua fotogrammetrisin menetelmin toimivaa, tosiaikaista mittausjärjestelmää ei ole vielä käytännössä kokeiltu. Tosiaikaisia automaattisella kuvamittauksella toimivia mittausjärjestelmiä on kuitenkin käytössä teollisuusrobottien ohjauksessa.



## 5.2 Paikannus eteenpäin leikkaamalla

### 5.2.1 Mittausmenetelmät

Järjestelmä koostuu kahdesta tai useammasta kamerasta, joiden sijainti tunnetaan. Kohde paikannetaan kolmiulotteisella eteenpäin leikkauksella (kolmioinnilla). Kaikilta samanaikaisesti otetuilta kuvilta mitataan ko. kuvapisteen koordinaatit. Saman kuvapisteen on oltava näkyvissä vähintään kahdella kuvalla, jotta sen sijainti olisi määritettävissä. Piste on myös oltava yksilöitävissä kuvankäsittely-operaatioiden avulla, jotta mittaus onnistuisi. Esimerkki tällaisesta mittausjärjestelmästä on Mapvision.

### 5.2.2 Mapvision - järjestelmän soveltuvuus

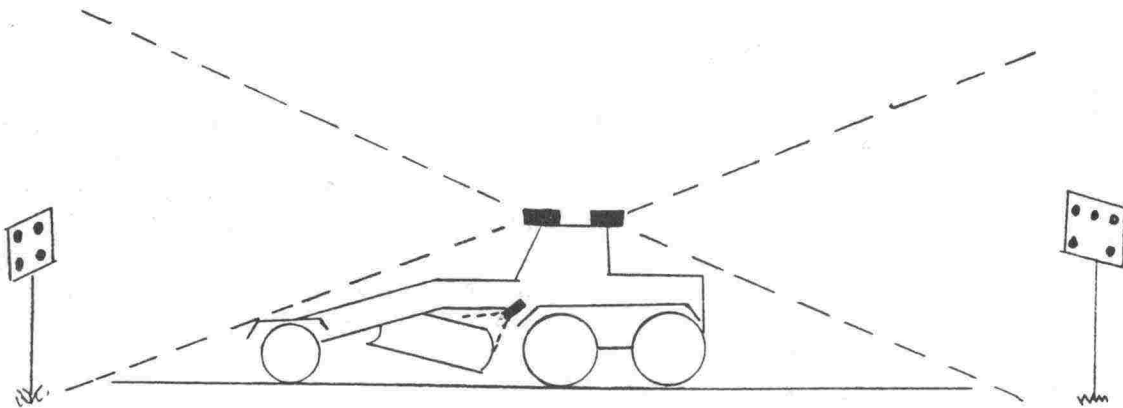
Mapvision on Suomessa kehitetty tosiaikainen kuvamittausjärjestelmä. Mapvision on suunniteltu lyhyillä etäisyyksillä (alle 25 m) erittäin suurella tarkkuudella (parempi kuin 1:10000) tapahtuvaan mittaukseen. Mittausjärjestelmä on ollut useamman vuoden käytössä ja kokemukset ovat olleet hyvät. Järjestelmää käytetään mm. Saab-Valmetin Uudenkaupungin auto-  
tehtaassa ja VTT/TIE:n profiilinmittausautossa.

Mapvision-järjestelmää ei kuitenkaan voida käyttää ajoneuvon paikantamiseen, koska järjestelmä on suunniteltu lyhyille etäisyyksille. Myös kahden kameran sijoittaminen siten, että samat työkoneessa olevat pisteet olisivat jatkuvasti molempien kameroiden kuvattavissa, tuottaisi suuria vaikeuksia. Mapvision-projektin tuomat kokemukset ja testitulokset järjestelmän komponenteista, sekä "raudasta" (hardware) että kuvankäsittely-ohjelmoinnista, ovat kuitenkin erittäin arvokkaita mahdollisessa kehitystyössä.

## 5.3 Paikannus taaksepäin leikkaamalla

Järjestelmä koostuu yhdestä tai useammasta kamerasta, jotka kuvaavat sijainniltaan tunnettuja tähyksiä. Kun tähyksien sijainti tunnetaan, saadaan kuvalle tallennetun tähyksigeometrian avulla taaksepäin leikkaamalla määritettyä kameran sijainti. Tällainen järjestelmä ("NRC") on käytössä mm. NASAn avaruussukkuloissa ja teollisuusroboteissa.

Kameran asentaminen työkoneeseen poistaisi rajoitukset koneen kulkusuunnan ja työskentelyetäisyyden suhteen niin kauan kuin tähystaulut näkyisivät. Työkoneen paikantamisessa kamerat asennettaisiin työkoneeseen kiinteästi esimerkiksi siten, että yksi kamera kuvaa koneen edessä ja toinen koneen takana olevia tähyksiä. Kahden kameran käyttö moninkertaistaa järjestelmän mittaus- ja toimintavarmuutta. Työkoneen paikantamisen lisäksi yksikuvamittausta voi hyödyntää koneen osien esim. levitysterän tai kauhan tarkan asennon määrittämiseen koneen rungon suhteen.

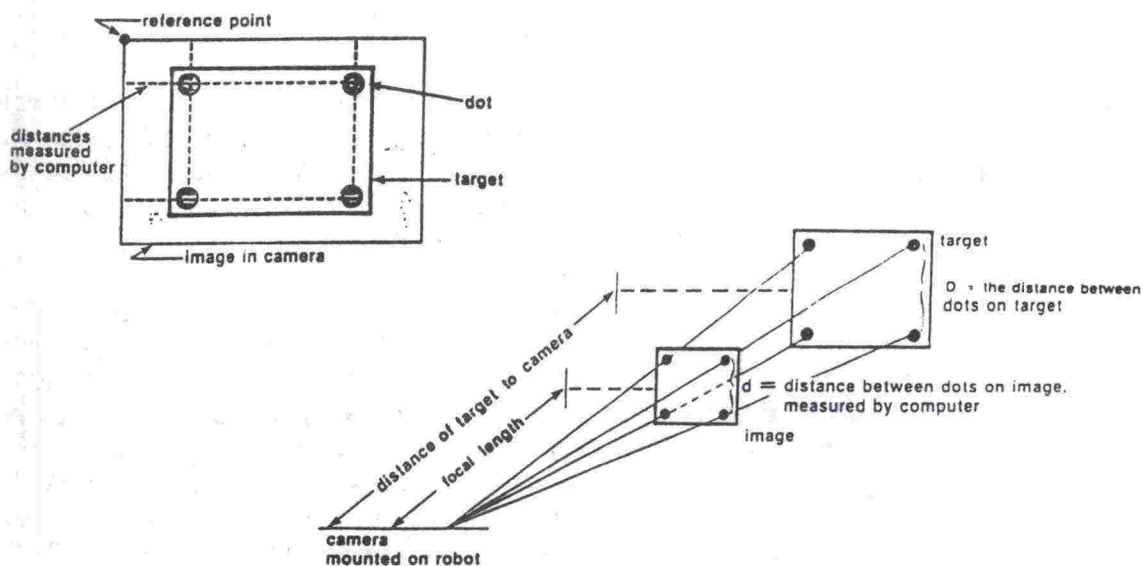


Kuva 1. Kameran asennettaisiin siten, että toinen kuvaa eteenpäin ja toinen kuvaa taaksepäin.

Picture 1. Camera mounting, one forwards another backwards.

NRC -mittausjärjestelmä perustuu menetelmään, joka tunnetaan nimellä "real-time single camera photogrammetry" (tosiaikainen yksikuvamittaus). Kuvaukset tapahtuvat siis yhdellä ccd-videokameralla. Järjestelmä mittaa kuvalla kuvautuneiden tähtien kuvakoordinaatit jokaiselle otetulle kuvalle. Kuvastiheys on 30 kuvaa sekunnissa.

Kuvakoordinaattien laskenta on nopeaa, koska kuvankäsittelyssä käytetään menetelmää, joka etsii kuvasta ainoastaan tietyn kirkkausasteen ylittävät kohteet (tähtykset). Muut häiritsevät signaalit voidaan kuvauksen yhteydessä poistaa suodattamalla kuva ja käyttämällä aktiivisia tähtyksiä (esim. pieniä paristolla toimivia lasereita).

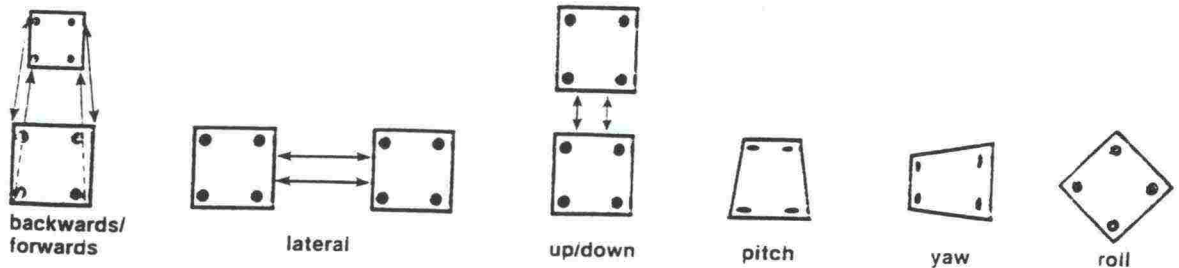


Kuva 2. Vasemmalla kuvakoordinaattien määrittäminen. Oikealla etäisyysmittauksen periaate;  $d:n$  suhde polttoväliin (focal length) on sama kuin  $D:n$  suhde etäisyyteen kamerasta kohteeseen.

Picture 2. Determination of image coordinates on the left. Principle of distance measurement on the right; relation between  $d$  and focal length is equal to relation between  $D$  and distance from camera to object.



Kuvakoordinaattien avulla voidaan kameran sijainti ja asento tähyksien suhteen laskea, koska tähyksien keskinäinen ja absoluuttinen sijainti tunnetaan. Alla olevasta kuvasta selviää, miten tähyksien kuvalle kuvautuneen geometrian perusteella voidaan määrittää kameran sijainti ja asento.



Kuva 3. Määritettävät liikkeet.  
Picture 3. Determined movements.

Järjestelmän mittausmatka on riippuvainen kameroiden optiikasta. Suurentavalla optiikalla saadaan lisää mittausmatkaa. Myös aktiivisten tähyksien käyttö lisää paikannusjärjestelmän toimintaetäisyyttä. On kuitenkin ilmeistä, että tähystauluja on oltava useampia kuin kaksi, jotta varmistetaan riittävä toimintaetäisyys ja taulujen jatkuva näkyvyys. Järjestelmän paikannustarkkuus on ilmeisesti cm:n luokkaa.

#### 5.4 Fotogrammetrisen mittausjärjestelmän edut

- kuvamittausjärjestelmä määrittää tarkasti työkonen kaikki liikkeet, sijainnin, asennon ja nopeuden kiintopisteiden suhteen,
- järjestelmä on itsenäinen ja reaaliaikainen; ainoa ulkopuolinen riippuvuus on kiintopisteille asennettavat tähykset,
- jos erillisiä tähyksiä ei voida sijoittaa esimerkiksi levitystetä, tähysgeometria voidaan korvata kohteen piirteiden geometriatiedoilla (esim. terän reunaviivat),
- kiintopisteille asennetut tähykset voidaan hyödyntää muiden työkonien paikantamisessa,
- järjestelmän rakennekomponentit (kamerat, kuvankäsittelyrutiinit) ovat tunnettuja ja testattuja ja
- Suomesta löytyy ko. alan korkeimpaa asiantuntemusta.

### 5.5 Fotogrammetrisen mittausjärjestelmän ongelmakohdat

- fotogrammetriset menetelmät ovat riippuvaisia näkyvyydestä,
- sääolosuhteiden vaikutuksesta aktiivisiin tähyksiin ei ole tietoa,
- tähykset on kuitenkin mitattava paikalleen, jollei runkopisteitä ole riittävästi tien laidassa ja
- valmista ko. tarkoitukseen tehtyä paikannusjärjestelmää ei ole olemassa.

### 5.6 Yhteenveto

Tosiaikaisen kuvamittausjärjestelmän hyödyntäminen työkoneen paikantamiseen rajoittuneella alueella on mahdollista. Järjestelmä olisi, kiintopisteille sijoitettuja tähystauluja lukuunottamatta, täysin itsenäinen paikannusjärjestelmä. Paikannustietoina saataisiin ajoneuvon kolmiulotteinen sijainti, nopeus, asento ja kulkusuunta.

Järjestelmä koostuisi työkoneeseen sijoitetuista kahdesta tai useammasta ccd-videokamerasta ja laskentaa hoitavasta tietokoneesta. Käytettävät komponentit ja ohjelmistot ovat käytännössä testattuja olemassa olevien kuvamittausjärjestelmien yhteydessä, mutta ajoneuvopaikannukseen tarkoitettua järjestelmää ei vielä ole kokeiltu.



## KIRJALLISUUSLUETTELO

### Servo-ohjattu takymetri:

- Geodimeter System 4000, User manual, Geotronics AB /Geodimeter division, 3/92 Danderyd, Ruotsi
- Geodimeter, Software & Datacommunication, Käyttäjän käsikirja, Geotronics AB/Geodimeter division, 10/91 Danderyd, Ruotsi
- Mittausautomaation hyödyntäminen maanrakennuskoneiden ohjauksessa, Tielaitoksen selvityksiä 39/1991, Helsinki 1991

### Videokuvaukseen perustuvat menetelmät:

- Haggren, Henrik; Haastattelu aiheesta "Fotogrammetristen menetelmien hyödyntäminen ajoneuvon paikantamisessa työmaalla", 18.6.1992, Otaniemi
- Leikas, Esa; Mapvision II - on line 3-D measuring systems, tuoteseloste, Oy Mapvision Ltd, Espoo
- Pinkney, H.F.L; Canex-2 Space Vision System Experiments for Shuttle Flight STS-54, SPIE vol. 1395 Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision 1990
- Steklasa, Robert; What the computer sees, Science dimension nro. 5/1985

## 4. MITATTAVAN TIEDON TALLENNUS JA TIEDONSIIRTO

Rekisteröitävä tieto määritellään tallennustaulukoiden (Table) avulla. Käytettävä taulukko voi olla ennalta määritetty tai käyttäjän luoma.

Mittaustuloksien rekisteröinti voidaan ohjata seuraavasti:

- \* antamalla komento tuloksia vastaanottavasta yksiköstä
- \* ohjaus takymetristä (REG)
- \* käyttämällä jatkuvaa tulostusta.

Tulostus voidaan ohjata suraviin tulostusyksikköihin:

- \* takymetrin sisäiseen muistiin (kapasiteetti 32 Kb/900 pistettä)
- \* Rpu:n sisäiseen muistiin (kapasiteetti 64 Kb/3000 pistettä)
- \* ulkoiseen muistiyksikköön Geodat 500 (kapasiteetti 64 Kb/3000 pistettä)
- \* RS-232 porttiin.

Tiedostojen siirtoon eri muistiyksiköiden välillä ja muistiyksiköistä tietokoneeseen on olemassa valmiita siirto ohjelmia.

## 5. RS-PORTIN OMINAISUUDET

Rs-portin parametrit:

- \* stop bits 1 tai 2
- \* data bits 7 tai 8
- \* parity (no, odd, even)
- \* baud 50 - 19200.

Mittaustuloksien rekisteröinnissä käytetään seuraavanlaista tulostusformaattia (ASCII):

<Label> = <Data> CRLF,  
missä Label on kokonaislukukoodi

esim. 37 x-koordinaatti  
38 y-koordinaatti  
39 z-koordinaatti  
52 kellonaika

Tulostuksessa annetaan ennen jokaista mittaustulosta mittaustapahtuman "tila"-tietoa (status). Tilatieto sisältää virheilmoituksia, varoituksia ja varmistuksen siitä että mittaus on kunnossa.

## 6. HINTA

Hintaluokka 250.000 - 300.000 mk



## A. GEODIMETER SYSTEM 4000 - TEKNISIÄ TIETOJA

### 1. KULMANMITTAUS

Takymetrissä on kaksisuuntainen akselivirheiden kompensattori, joka korjaa seuraavat virheet;

- \* pysty- ja vaakakehän epäkeskisyys- ja jakovirheet
- \* pysty- ja vaakakselin kollimaatiovirheet
- \* pystyakselin tappikaltevuuden.

Takymetrin tasausta valvotaan elektronisesti ja virheel-  
lisestä tasauksesta annetaan virheilmoitus.

### 2. ETÄISYYDENMITTAUS

Etäisyydenmittausta voidaan suorittaa kolmella eri menetel-  
mällä:

- \* standardimittaus STD (tarkkuus  $\pm 5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm}$ )
- \* tarkkamittaus D (tarkkuus  $\pm 2 \text{ mm} + 3 \text{ ppm}$ )
- \* seurantamittaus TRK (tarkkuus  $\pm 10 \text{ mm} + 5 \text{ ppm}$ )

Seurantamittauksella saadaan tulos 0.4 s sen jälkeen kun  
takymetri on kohdistettu heijastimeen.

Etäisyydsmittauksen mittausetäisyydet;

- \* minimietäisyys 0,2 m
- \* maksimietäisyys (yhdellä heijastimella) 3.300 m
- \* 8 heijastimella voidaan mittausetäisyyttä pidentää  
7 km:iin
- \* automaattinen seurantamittaus RPU:hun max. 500 m

### 3. STANDARDIVIRTALÄHTEET

Takymetri

Ulkoinen akku

- \* 12 V/6 Ah NiCd
- \* kesto jatkuvassa käytössä 6 h
- \* yhdistetty kaapelilla takymetriin
- \* latausaika 14 - 16 h

RPU

Sisäinen vaihdettava akku

- \* 9.6 V/1.4 Ah NiCd
- \* kesto jatkuvassa käytössä 4 h
- \* latausaika 14 - 16 h

Rpu:hun voidaan myös liittää ulkoinen akku tai muu vir-  
talähde. Esim. työkonse sovelluksessa ottaa virtaa suoraan  
työkoneen akusta.

**B. TOPCON AP-S1 - TEKNISIÄ TIETOJA**

**1. YLEISTÄ**

Takymetri pystyy seuraamaan liikkuvaa kohdetta. Kohteen maksiminopeus seurannan onnistumiseksi on 17,6 m/s. Seurantamittaus on rajoitettu. Vaakakulman suhteen maksimi työkentelysektori on 320° ja pystykulman suhteen maksimi työkentelysektori on 60°. Myös estintätoiminto on sektoreilla rajoitettu, jolloin suurin etsintäsektori vaakakulman suhteen on 16° ja pystykulman suhteen 2°. Laite ei ole vielä Suomessa myynnissä.

**2. KULMANMITTAUS**

Kulmamittauksen tarkkuus seurantamittauksen aikaan, kun kohde liikkuu sallitulla maksiminopeudella (17,6 m/s) on  $\pm 2'$ .

**3. ETÄISYYDENMITTAUS**

Etäisyysmittauksen tarkkuus seurantamittauksen aikana (TRK-tila) on  $\pm (5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm})$ .

Mittausaika TRK-tilassa on 2 s.

Etäisyysmittauksen mittausetäisyydet;

- \* 5 heijastimella 100 - 2.500 m
- \* 9 heijastimella 100 - 2.800 m

**4. HINTA**

Hintaluokka n. 150.000 mk



**C. WILD TM3000D - TEKNISIÄ TIETOJA****1. YLEISTÄ**

Wild TM3000D on elektroninen servo-ohjattu teodoliitti, jonka päälle voidaan kiinnittää Wildin etäisyysmittari. Yhdistelmä vastaa näin ollen servo-ohjattua takymetriä.

Wild T3000 sarjaan kuuluu useampia servo-ohjattuja teodoliitteja erillaisilla ominaisuuksilla ja erilaisilla ohjelmistoilla. Yhteistä kaikille on se, että ne on suunniteltu paikallaan olevan kohteen mittaukseen. Joissakin malleissa on toteutettu järjestelmä, joka pystyy löytämään tähyksen ja/tai heijastimen automaattisesti, mutta liikkeessä olevan heijastimen seurantamittausta ei ilmeisesti ole toteutettu. Heijastimen ja/tai tähyksen löytäminen toimii teodoliitin mallista riippuen joko etäisyysmittauksen signaalivoimakkuuden perusteella tai teodoliitissa olevan ccd-kameran kuvan perusteella suoritettavan hahmontunnistuksen avulla. Viimeksi mainittu tapa mahdollistaisi systeemin jatkokehittämisen ajoneuvon paikantamisessa.

**2. KULMANMITTAUS**

Servo-ohjatun mittauksen työskentelyalue ei ole rajoitettu. Teodoliitissa on kaksisuuntainen akselivirheiden kompensointtori, joka korjaa seuraavat virheet;

- \* pysty- ja vaakakehän epäkeskisyyss- ja jakovirheet
- \* pysty- ja vaakaakselin kollimaatiovirheet
- \* pystyakselin tappikaltevuuden.

Yhden kulmanmittauksen aika 0.9 s.

Kulmanmittauksen keskivirheet:

- \* vaakakulma 0,00015 gon
- \* pystyakselin kulma 0,00015 gon.

**3. ETÄISYYDENMITTAUS**

Valittu etäisyysmittari vaikuttaa etäisyysmittauksen ominaisuuksiin.

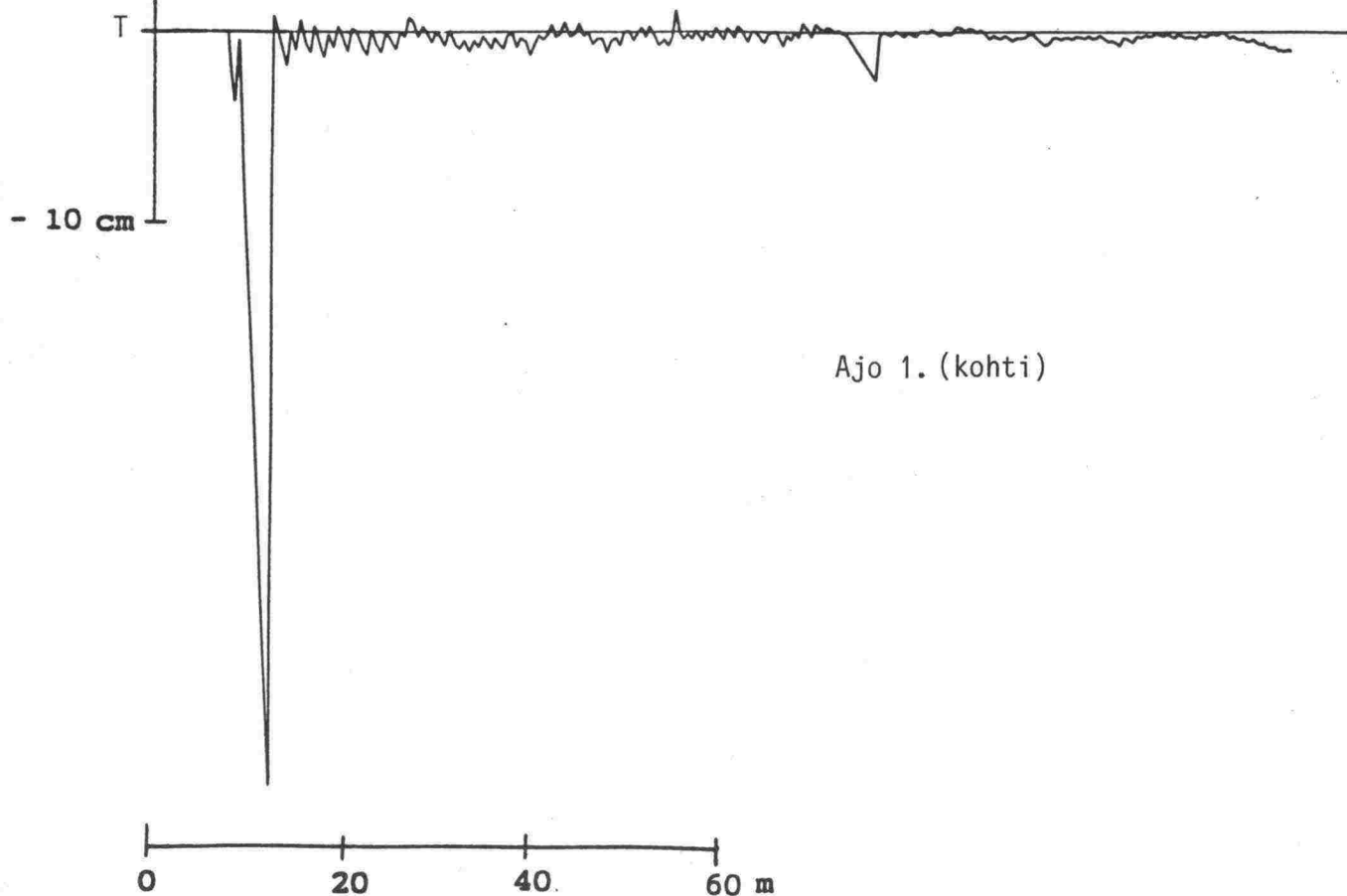
**4. TIEDONSIIRTO**

Interface	RS232 (CCITT V24)
Siirtonopeudet	2400 - 19200 baud
Formaatti	ASCII

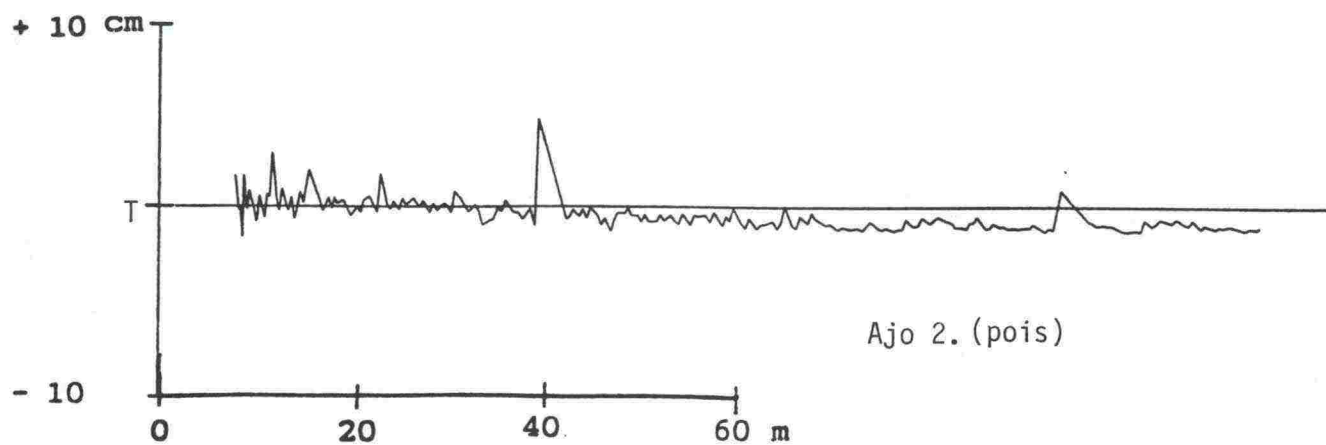
**5. HINTA**

Hintaluokka n. 300.000 mk + etäisyysmittarin hinta

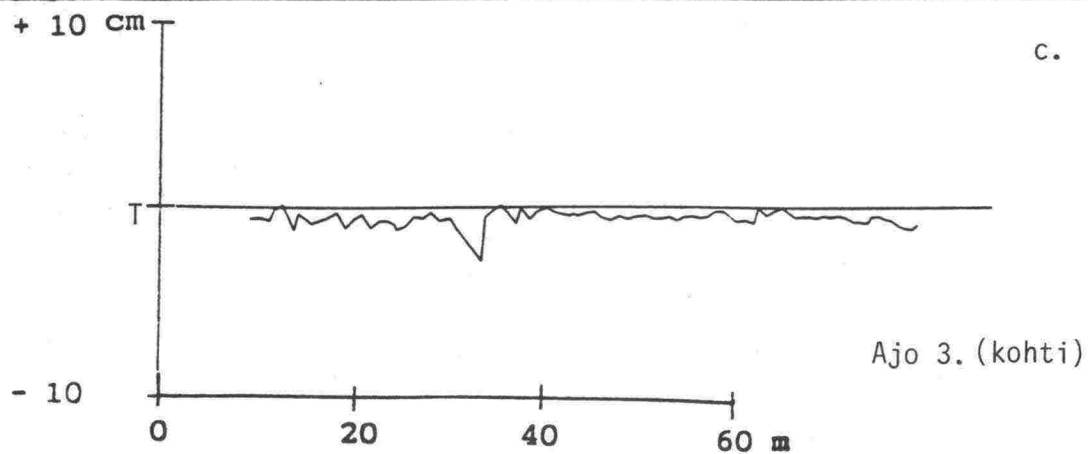
Liite 2 a.



b.

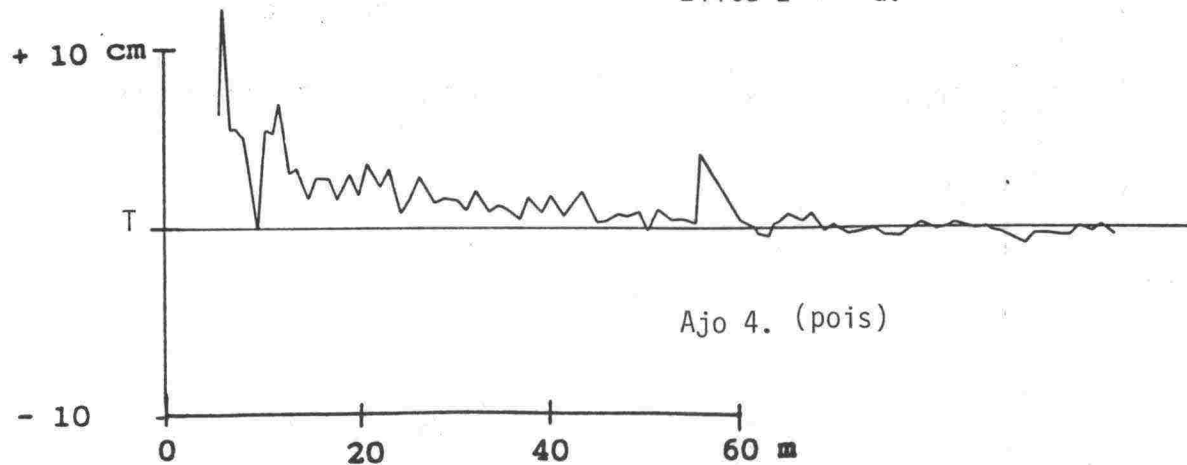


c.

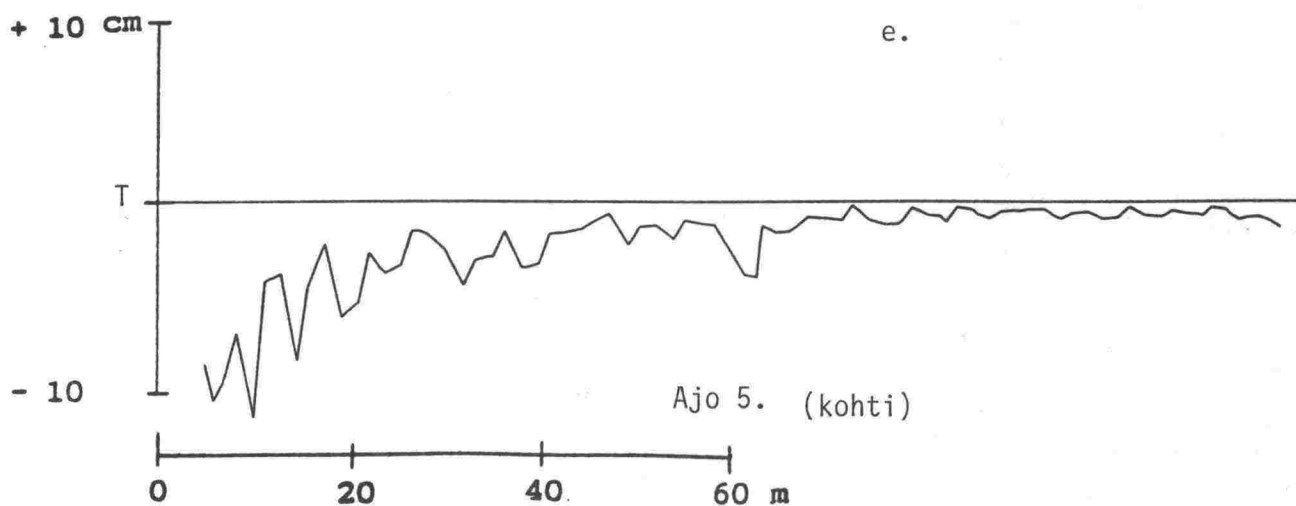




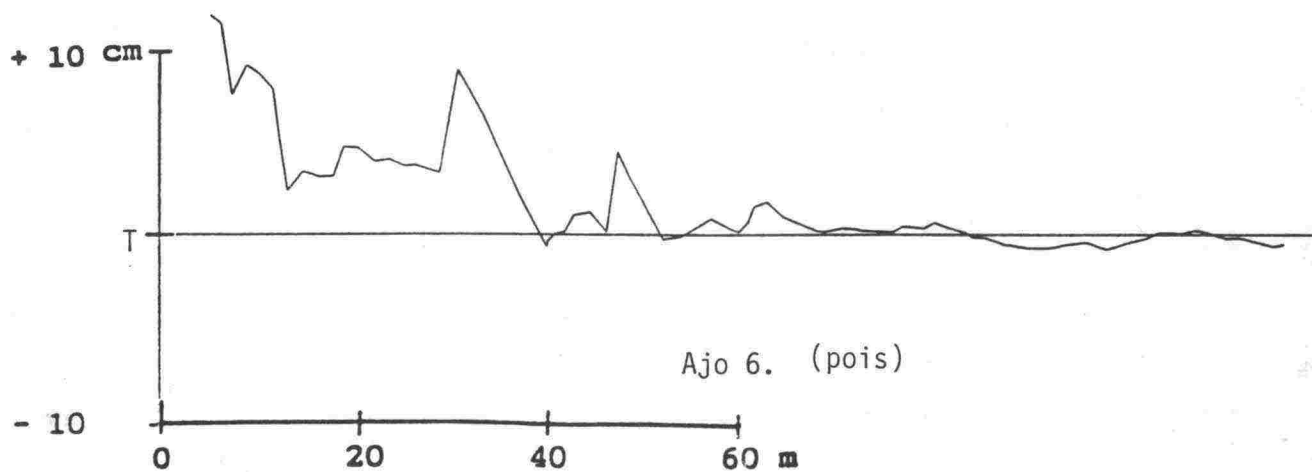
Liite 2 d.



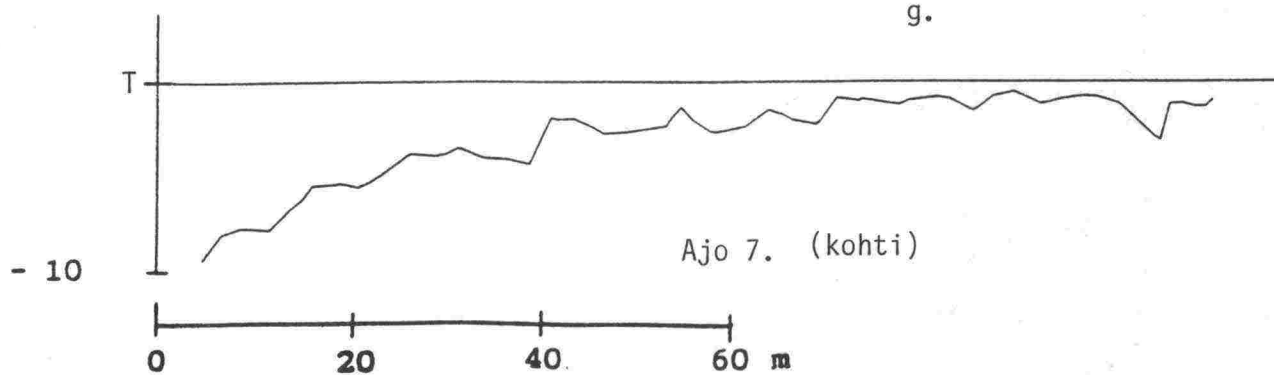
e.



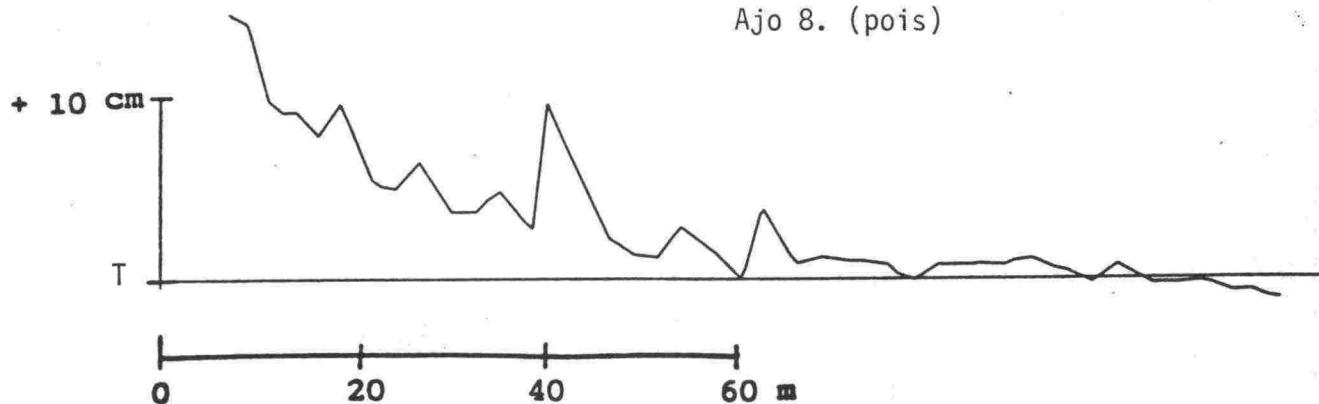
f.



g.

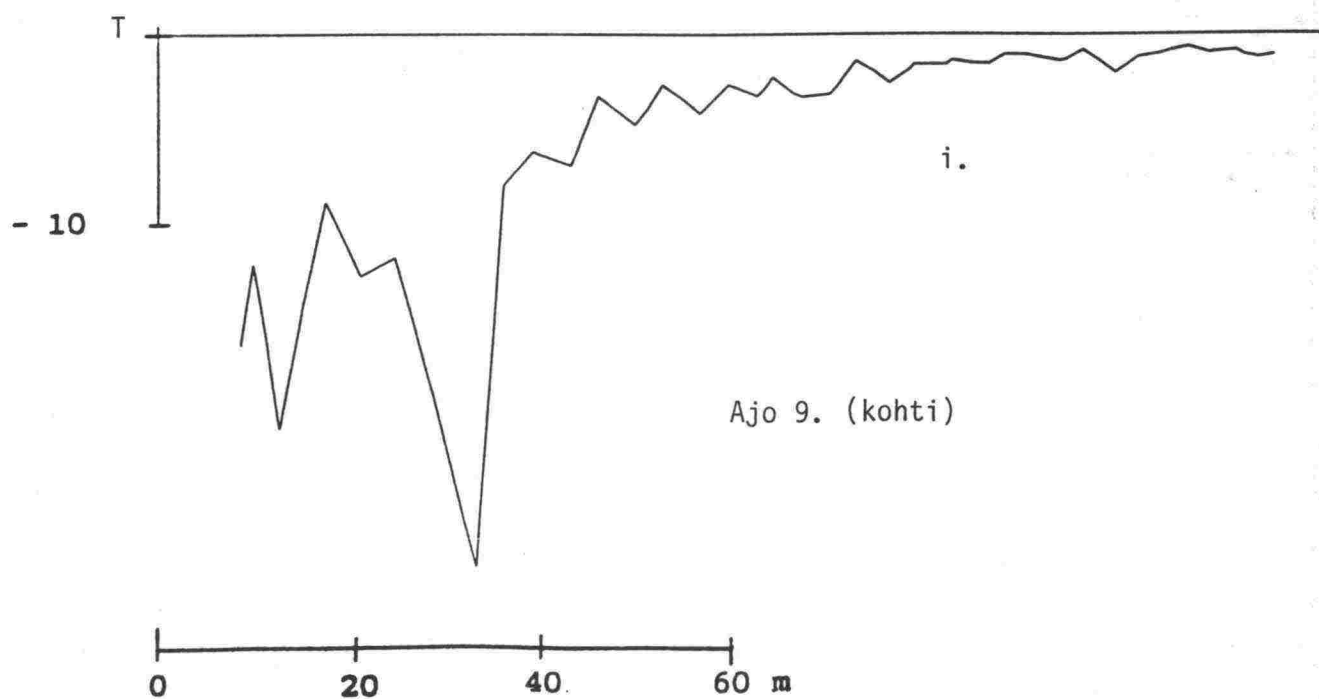


Ajo 8. (pois)



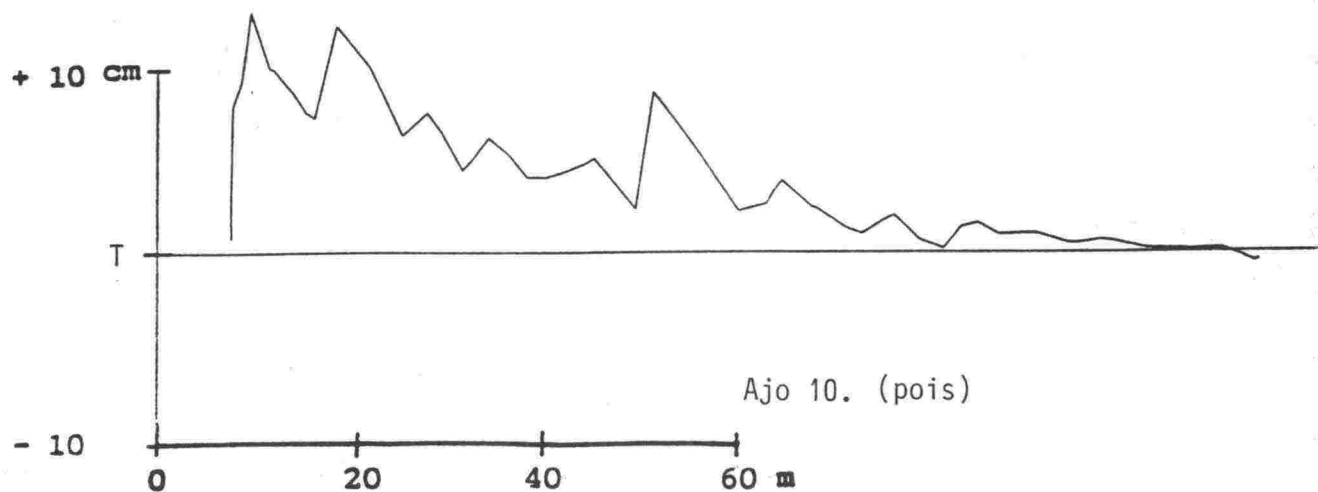
i.

Ajo 9. (kohti)

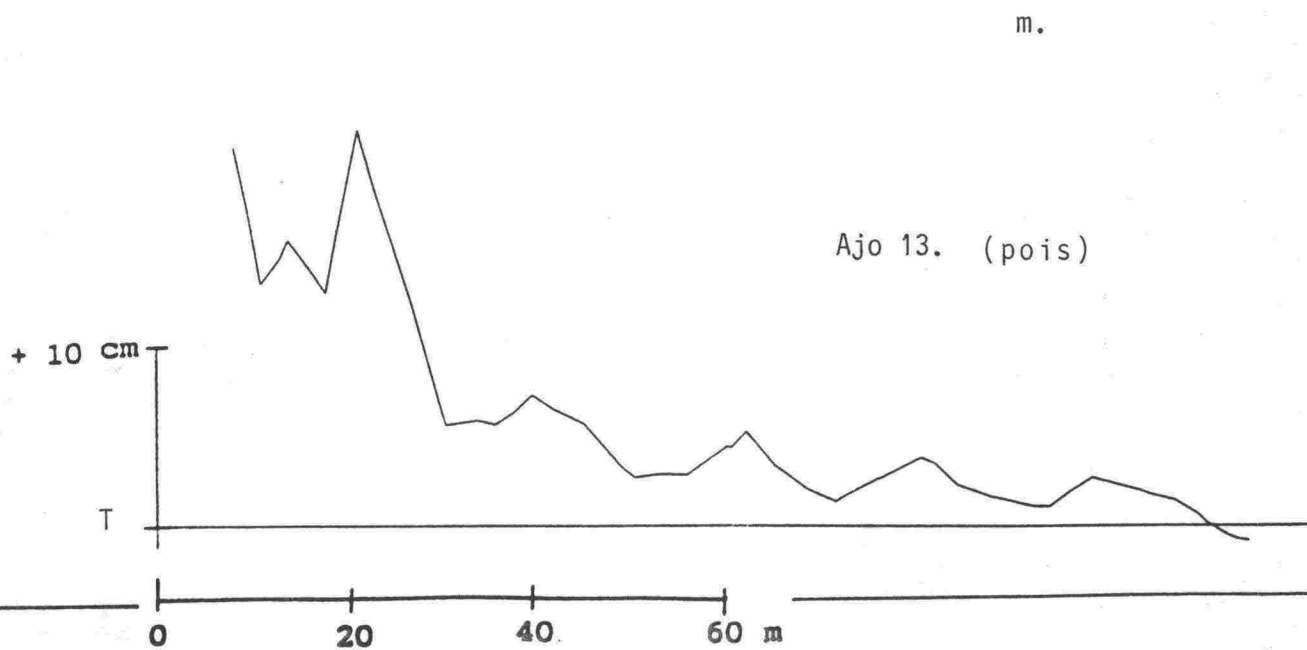
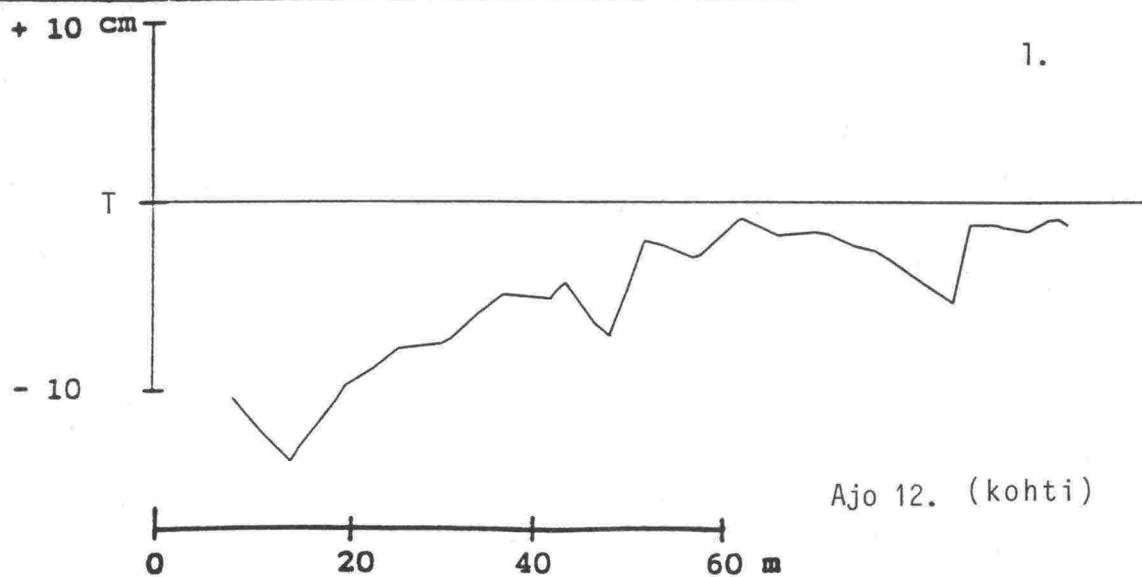
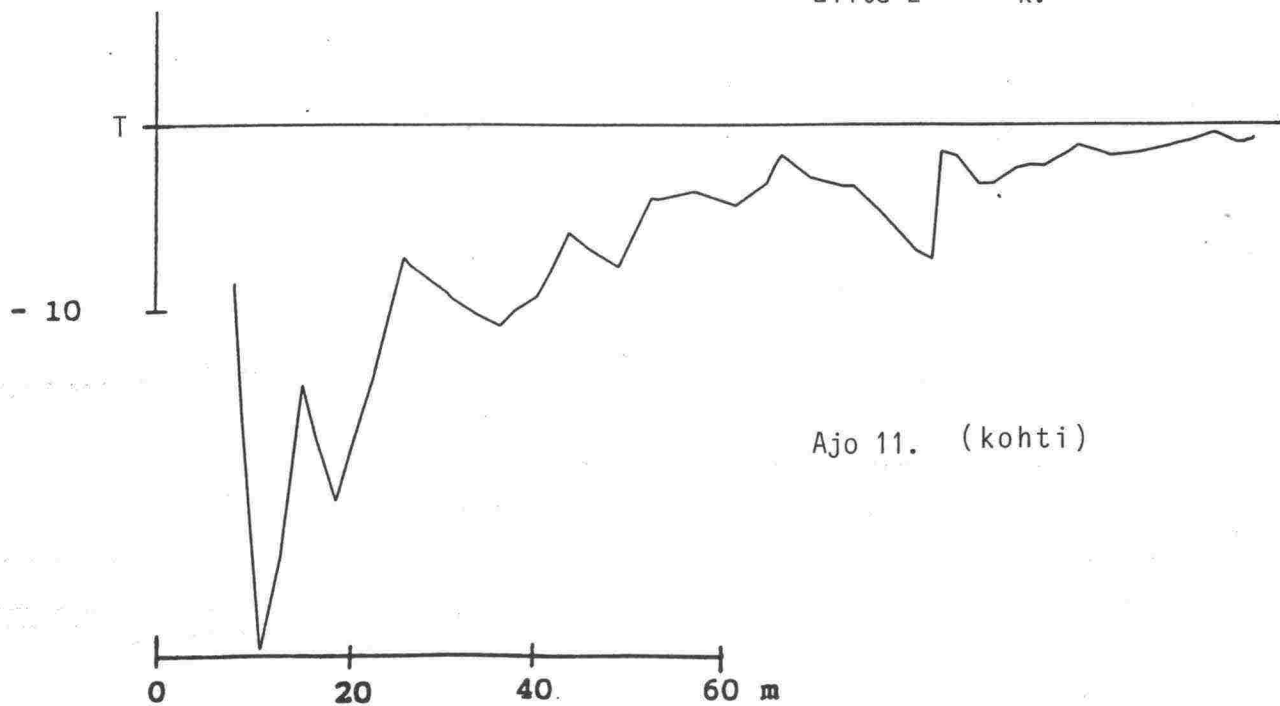


j.

Ajo 10. (pois)







**TESTIN KANNALTA TÄRKEIMPIEN  
TIERAKENTEIDEN TARKKUUSVAATIMUKSET**

	<b>suurin sallittu epätasaisuus</b>	<b>yläpinnan taso</b>
Kantava kerros	20 mm/5 m	± 20 mm
Jakava kerros	30 mm/5 m	0 ... -40 mm
Suodatin- ja eristyskerros	50 mm/5 m	± 50 mm
Maan penkereet		0 ... -100 mm
Maanleikkaustyöt		0 ... -100 mm
Ojan pohja		0 ... -100 mm

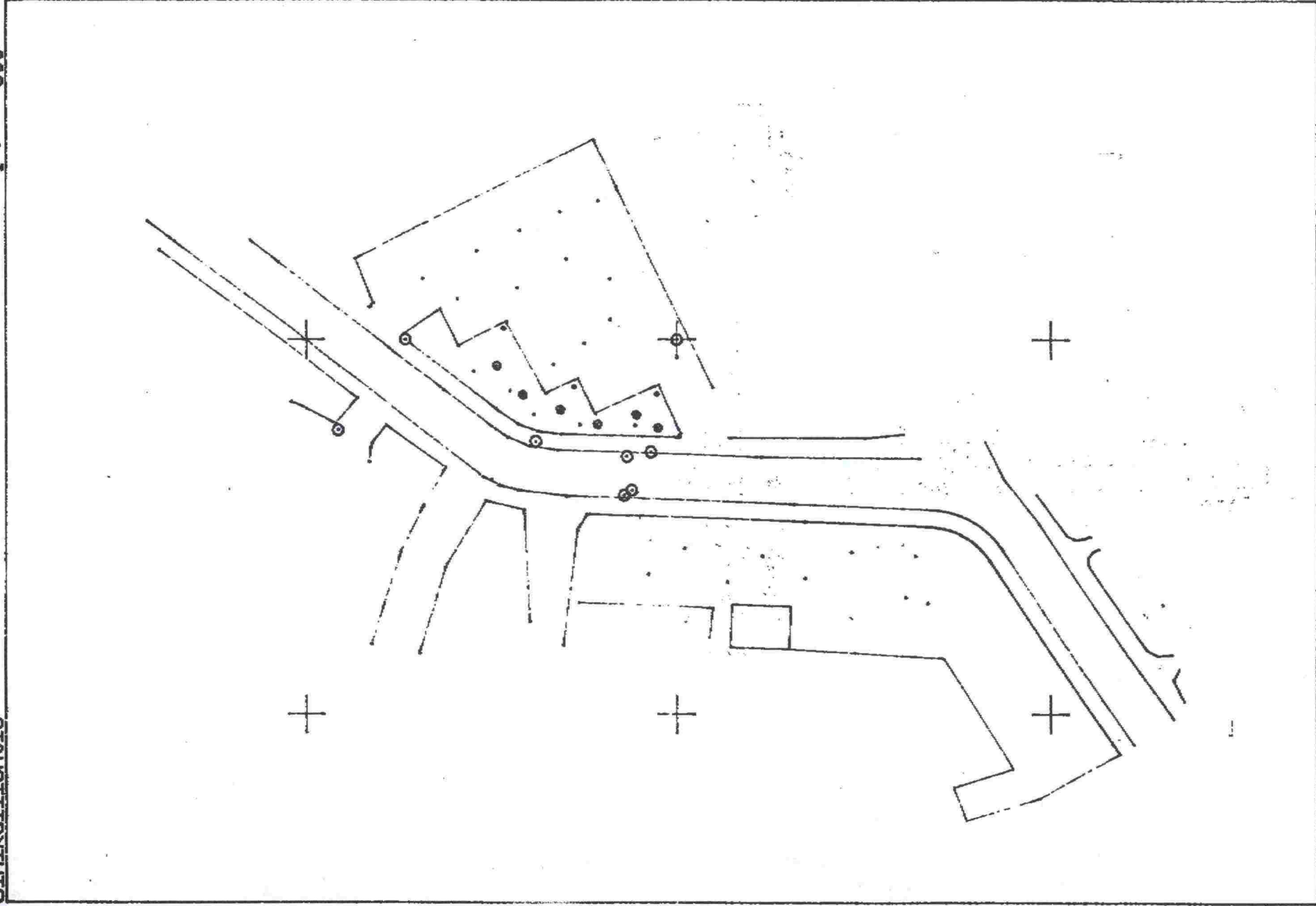
**LÄHTEET**

Tielaitos: Penger- ja kerrosrakenteet,  
Työselitykset ja laatuvaatimukset  
Tiehallitus, Helsinki 1991

Tielaitos: Leikkaukset, kaivannot ja avo-ojaraken-  
teet, Työselitykset ja laatuvaatimukset  
Tiehallitus, Helsinki 1991

AAA

STATION 1000





## LAUSUNTO

### GEODIMETER 4400 KÄYTTÖ TYÖKONEIDEN OHJAUKSESSA

Ensinnäkin on huomioitava, että testimittauksissa käytetty koje Geodimeter 4400 on valmistettu aivan normaalia maastomittauskäyttöä varten. Sen oleelliset toimintaosat ovat seuraavat:

1. Elektroninen takymetri
  - Sisäisellä ohjelmistolla
  - Sisäisellä muistilla n. 10000 pisteelle
  - Normaali- ja pikamittaustoiminnot
  - Laitevirheden korjausjärjestelmä
2. Autotracker
  - Pitää liikkuvan kohteen mittaussäteessä ja suorittaa automaattisen kohdistuksen
3. Servot
  - Servomootoreilla ohjataan laitteen liikkeitä joko sisäisen tai ulkopuolisen tietokoneen ohjelmien avulla
4. Haku tuntemattomasta
  - Toiminto kojeella, joka mahdollistaa etukäteen tuntemattoman paikan löytämisen
5. Telelinkit
  - Sisäänrakennetut
  - Mahdollistaa reaaliajassa dataviestinnän langattomasti
6. RPU 4000 -vastaanotin
  - Sisäiset ohjelmat
  - Sisäinen muisti n. 10000 pisteen tiedoille
  - Sisäinen telelinkki

### MITTAUSTARKKUUDET

Mikäli halutaan tutkimustyössä toteutuneisiin mittaustarkkuuksiin parannusta, tarvittavat vaatimukset on yksilöitävä niin, että ne tuotannossa voidaan pyydetäessä huomioida. Esimerkiksi automaattisen kulmaliikkeen ja etäisyyden mittauksen erillisellä synkronoinnilla on mahdollista parantaa dynaamista tarkkuutta, jos samalla laitteen liikeradat halutaan nopeammiksi.

### PYSYVÄ YHTEYS VASTAANOTTIMEEN

Työmaaolosuhteissa häiritsevää peitteellisyyttä on huomattavasti vähemmän kuin normaalissa maastomittauksessa. Jos mittausaseman paikka valitaan oikein, on mittausyhteyden katkeaminen harvinaista. Kuitenkin jos näin tapahtuu, on mahdollista valmistaa vastaanotin useammasta RTM-yksiköstä, jotka sijoitetaan ympyrän kehälle. Tämänkaltaisen vastaanottimen osalta valmistaja ei ole vielä lopullista teknistä ratkaisua ilmoittanut.

### REAALIAIKAINEN TULOSTUS

Testityössä reaaliaikaisuutta kokeiltiin RPU-yksiköllä. Vastaava asia voidaan tehdä suoralla yhteydellä tietokoneeseen, jolloin toiminto nopeutuu. Tässä tapauksessa nopeus on kiinni enemmän vastaanotto-ohjelmasta.

Reaaliaikaisen mittauksen nopeus tämän hetken muilla Geodimeter-erikoismalleilla kuin Geodimeter 4400:lla on mahdollista 35 km/h liikkuvaan kohteeseen, vieläkin nopeammin ILS-laitteiden kontrollimittauksissa.

## TIEDONSIIRROT

Reaaliaikainen tiedonsiirto mittausasemasta vaikka työkoneessa olevaan tietokoneeseen on mahdollista 19200 baudin nopeudella. Datalla ei ole merkitystä, ovatko ne koordinaatteja, havaintoja vai laskettuja arvoja.

Tiedonsiirto on täysin hallittavissa sekä tietokoneelta että mittausasemalta.

Itsestään selvää on tiedonsiirron kaksisuuntaisuus kaikilta osa-alueiltaan.

Tämä antaa mahdollisuuden liittää mittausjärjestelmä reaaliaikaisesti minkätasoiseen ohjelmistoon tahansa.

Laitetoimittajan näkökulmasta katsottuna jo tällainen "normaali" yhden käyttäjän mittausasema soveltuu työkoneen ohjaukseen. Se kykenee antamaan kohteelle sijaintitiedon reaaliajassa, hyvällä tarkkuudella samanaikaisesti x,y,z-muodossa.

Sen havaintokuntoon laittaminen on verrattain nopeata. Sillä voidaan hallita laaja työalue suuristakin maastovaihteluista huolimatta.

Suurin kehittämisen kohde on vastaanotin, juuri sopivaksi työkoneeseen. Tosin tehtaan viimeisimpiä ratkaisuja ei ole vielä tiedossa.

Laitteiston kannattavuutta ajatellen se soveltuu kaikkeen mahdolliseen muuhunkin työmaamittaukseen, eikä tarvitse kuin yhden käyttäjän.

GEODITECH OY

## AJONEUVO- JA TYÖKONEPAIKANNUS

## SERVO-OHJATTUA TAKYMETRIÄ JA MERKINTÄLASKUA KÄYTTÄEN

Kari Rintanen

VTT Sähkö- ja Automaatiotekniikan laboratorio  
Otakaari 7 B, 02150 Espoo  
puh: 90-4561

## 1. Taustaa

VTT:n Sähkö- ja Automaatiotekniikan Laboratorion ja TKK:n Automaatiotekniikan Laboratorion yhteishankkeessa on kehitetty servo-ohjattuun takymetriin ja merkintälaskuun perustuva reaaliaikainen navigointijärjestelmä työkoneen tai ajoneuvon paikan ja asennon määrittämiseksi. Navigointijärjestelmän kehitys liittyy läheisesti PANORAMA-ESPRIT projektiin (1989-1993), jossa kehitetään autonomisen ajoneuvon navigointi- ja sensorijärjestelmiä (Perception and Navigation System for Autonomous Mobile Applications). Navigointijärjestelmän toimintaa on demonstroitu PANORAMA-projektissa.

Työkoneiden käytännön paikannustarkkuusvaatimus on noin 10-30 cm liikkeen aikana. Tätä käytettiin kriteerinä eri paikannustekniikoiden soveltuvuutta vertaillen. Lähtökohtana oli käyttää mahdollisimman pitkälle kaupallisia tuotteita, sillä anturiteknologiseen kehitykseen ei haluttu suuntautua. Esiselvitysten jälkeen päädyttiin käyttämään Geotronicsin valmistamaa servo-ohjattua takymetriä Geodimeter 140T, jota täydennettiin ajoneuvoon sijoitetulla merkintälasku- ja asennointijärjestelmällä. Ajoneuvoon sijoitettu anturointi koostuu gyroskoopeista, kiihtyvyyssantureista sekä odometri-antureista, joilla mitataan pyörien tai telojen kulkemaa matkaa ja pyörimisnopeutta. Edullisten, autoteollisuuden käyttöön tarkoitettujen gyroskooppien soveltuvuutta tutkittiin erityisesti VTT/SÄH:n ja TKK/AUT:n OUTDOOR-ROBOTICS -projektissa.

Laitteiston kokonaishinta takymetreineen on arviolta 400.000-500.000 markkaa. Huolimatta korkeahkosta hinnastaan, kehitetty



navigointijärjestelmä on käytännössä edullisin harvoista olemassaolevista vaihtoehtoista tässä tarkkuusluokassa. Todettakoon vertailun vuoksi, että esim. differentiaalisella GPS-tekniikalla (satellittipaikannuksella) päästään vain noin 2 m tarkkuuksiin, joten tätä tekniikkaa ei voitu soveltaa. Edullisempiin tekniikoihin, esim. kameran, ultraäänen tai mikroaaltojen käyttöön perustuvat kaupalliset järjestelmät ovat toistaiseksi vain lyhyen kantaman (yleensä sisätilojen) järjestelmiä.

Tässä paperissa kuvatun järjestelmän kehityksen jälkeen Geotronics on tuonut markkinoille uuden servo-ohjatun takymetrimallin, Geodimeter System 4000, joka soveltuu entistä paremmin ajoneuvopaikannukseen ja antaa mm. liikkeessä huomattavasti paremman mittaustarkkuuden kuin malli 140T.

## 2. Navigointijärjestelmän ja takymetripaikannuksen ero

Servo-ohjattua takymetriä ei varsinaisesti ole suunniteltu ajoneuvonavigointiin, eikä se yksinään täytä reaaliaikaisen navigointijärjestelmän vaatimuksia. Takymetri laskee liikkuvan ajoneuvon tarpeita ajatellen paikkatietoa suhteellisen harvakeen, keskimäärin 0.8 sekunnin välein. Tämä vastaa noin 1-3 metrin kuljettua matkaa ajoneuvon matalilla nopeuksilla. Takymetri ei myöskään anna tietoa ajoneuvon asennosta eikä kallistuksista. Ajoneuvon asento on paikannuksessa oleellinen tieto, sillä asentotiedon puuttuessa ei ajoneuvon kiinnitetyn heijastimen sijaintitiedosta voida päätellä ajoneuvon muiden pisteiden sijaintia. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, ettei esim. ajoneuvon referenssipisteen (painopiste, akselien keskipiste tms.) sijaintia, tai työkalun (kauha, höylä, pora) sijaintia tiedetä.

Servo-ohjattu takymetri luo kuitenkin perusedellytykset suorituskäytännön navigointijärjestelmän rakentamiseksi. Toimiva navigointijärjestelmä edellyttää takymetrin lisäksi ajoneuvon sijoitettavan anturoinnin, jolla mitataan ajoneuvon nopeutta, suuntaa, kääntymisnopeuksia sekä kallistuksia. Suunnan- ja nopeudenmäärittämisessä voidaan tällöin käyttää suhteellisen edullisia antureita, sillä merkintälaskulle tyypillinen mittausvirheiden kumuloituminen voidaan estää takymetrin antaman

paikkatiedon perusteella.

### 3. Testiajoneuvo

Navigointijärjestelmän testaukseen on käytetty pääasiassa TKK:n Automaatiotekniikan Laboratorion testiajoneuvoa, nelipyörävetoista maastoajoneuvoa (Honda All Terrain Vehicle), kuva 1. Ajoneuvo on navigointijärjestelmän lisäksi instrumentoitu automaattiohjausta varten ja ajoneuvoa voidaan ajaa tietokoneohjauksessa.

### 4. Laitteiston rakenne

Laitteiston rakenne on esitetty kuvassa 1. Servo-ohjattu takymetri on liitetty tukiasema-tietokoneeseen, joka on radiomodemin välityksellä yhteydessä ajoneuvon sijoitettuun tietokonelaitteistoon. Ajoneuvon on asennettu maston päähän sylinterin muotoinen heijastin, jonka takymetri kykenee havaitsemaan kaikista suunnista. Takymetrin mittaama paikkatieto siirretään radiomodemilla ajoneuvon, jossa sitä käytetään hyväksi paikanmäärityksessä. Ajoneuvon sijoitettu anturointi koostuu kuituoptisista sekä pietsosähköisistä värähtely-gyroskoopeista, kiihtyvyysantureista, sekä ajoneuvon pyöriin sijoitetuista kulma- tai pulssiantureista, joilla mitataan ajoneuvon kulkemaa matkaa ja nopeutta. Ajoneuvon asentoa mittaava gyroskooppijärjestelmä on rakenteeltaan 'Strapdown'-arkkitehtuurin mukainen, eikä sisällä lainkaan liikkuvia osia. Ajoneuvon sijoitettu tietokone fuusioi saamansa mittaustiedon ja laskee reaaliaikaisen (10 Hz) paikka- ja asentotiedon ajoneuvolle.

### 5. Paikannusmenetelmän kuvaus

Paikannusmenetelmän ytimenä on merkintälaskuun perustuva algoritmi, jossa ajoneuvon nopeus- ja kääntymisnopeustietoja integroidaan reaaliajassa ns. Kalman-suodinta käyttäen. Takymetriltä saatavaa x-y-z -paikkatietoa sekä kiihtyvyysanturien lukemia käytetään paikka- ja asentoestimaattien korjaamiseen. Takymetriltä saatavan paikkatiedon mm. radioyhteyksistä johtuva viive kompensoidaan ns. ennustamismenetelmällä.

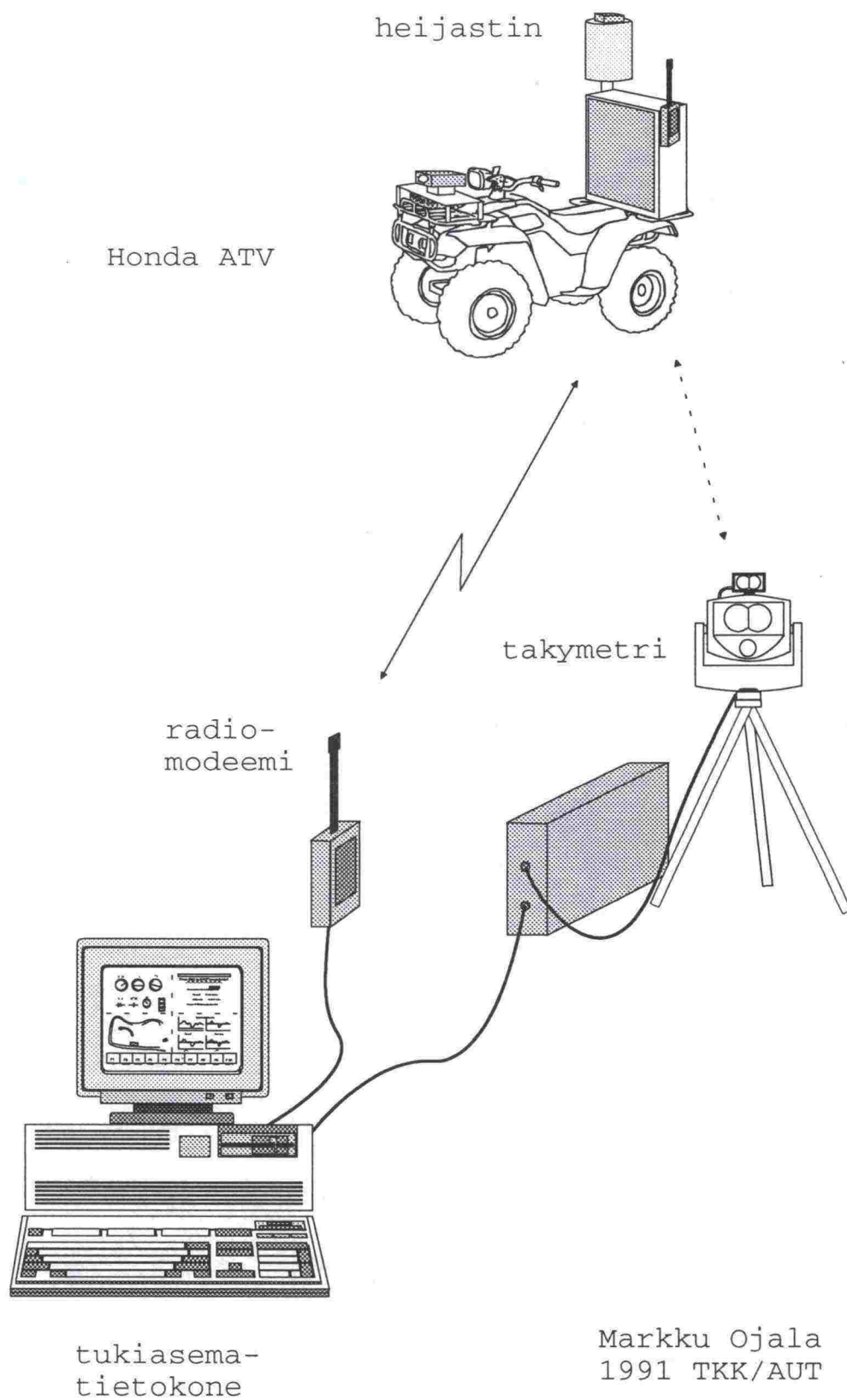
### 6. Käytännön tulokset



Paikannusjärjestelmää on käytetty PANORAMA-ESPRIT-projektin demonstraatioissa mm. automaattiseen rataseurantaan. Järjestelmä on osoittautunut käytännössä toimivaksi, joskaan Geodimeter 140T ei kykene seuraamaan kohdetta lähempää kuin noin 60 metrin etäisyydeltä. Geodimeter System 4000-takymetrillä ei kuitenkaan ole tätä rajoitusta.

Geodimeter 140T:n dynaaminen paikannustarkkuus liikkeessä on valmistajan mukaan  $\pm 0.3$  m M.S.E. nopeudella 4 m/s. Testeissä kokonaisjärjestelmän paikannustarkkuuden arvioitiin merkintälaskun ja takymetrin mittauksia keskenään vertailemalla olevan keskimäärin parempi kuin  $\pm 0.2$  m ajoneuvon liikkeessä. Paikannuksen tarkkuuden paraneminen selittyy Kalman-suotimen mittauskohinaa suodattavalla vaikutuksella. Toisaalta testeissä käytetyt nopeudet olivat pienempiä kuin 4 m/s. Huomattakoon, että uudemman takymetrimallin Geodimeter System 4000 paikannustarkkudeksi liikkeessä luvataan  $\pm 10$  mm M.S.E, joten selviä parannuksia on odotettavissa uudempaa mallia käytettäessä. Paikannustarkkuuteen vaikuttavat oleellisesti myös käytettyjen gyroskooppien laatu ja hinta. Ajoneuvon paikallaan ollessa paikannustarkkuus on selvästi parempi kuin liikkeessä, käytännössä sama kuin takymetrin stattinen mittaustarkkuus.





## TESTITULOKSIEN LASKENNASSA KÄYTETYT KAAVAT

TAULUKKO 3  
(s. 18)

$$\text{keskim.} \quad \frac{\sum |h_e|}{n}$$

missä  $h_e$  = todettu korkeusvirhe  
 $n$  = havaintojen lukumäärä

TAULUKKO 4  
(s. 20)

$$\text{keskiarvo} \quad \frac{\sum h_c}{n_{2000}}$$

$$\text{keskivirhe} \quad \frac{\sqrt{\sum h_e^2}}{n_{2000}}$$

missä  $h_e$  = näytekohdassa todettu korkeusvirhe  
 $n_{2000}$  = otettujen näytteiden lukumäärä  
 (n = 2000)

Mittattu pituusleikkaus on jaettu 2000 osaan. Jokaisessa kohdassa on liikkeessä mitattua profiilia verrattu referenssiprofiiliin. Vertailukohdassa ollut korkeusero =  $h_e$ .

TAULUKKO 6  
(s. 20)

$$\text{keskiarvo} \quad \frac{\sum |d_{xy}|}{n}$$

missä  $d_{xy} = \sqrt{(x_t - x)^2 + (y_t - y)^2}$   
 $x_t, y_t$  = tunnetut koordinaatit  
 $x, y$  = havaitut koordinaatit  
 $n$  = havaintojen lukumäärä

$$\text{keskivirhe} \quad \frac{\sqrt{\sum d_{xy}^2}}{n}$$

TAULUKKO 7  
(s. 27)

$$d_x = x_t - x$$

## TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 50/1992 Tiemerkintämassojen käyttökelpoisuus. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 51/1992 Roadside Restareas and Restarea Structures and Equipment. TIEL 3200041E
- 52/1992 Kuntien liikenneturvallisuus vuosina 1982-1990. TIEL 3200103
- 53/1992 Henkilöautojen omistus, ajoneuvosuoritteet ja käyttöalueet. TIEL 3200104
- 54/1992 Selvitys liikennevalojen toiminnasta vähäisen liikenteen aikana. TIEL 3200105
- 55/1992 Kiertoliittymän liikenteelliset vaikutukset; ennen-jälkeen -tutkimus Lammin maantieliittymässä. TIEL 3200106
- 56/1992 Kaupunkimuotoilun historia, nykyaikaisen tie- ja liikennesuunnittelun historiallinen tausta. TIEL 3200107
- 57/1992 Teiden suolauksen aiheuttamien ympäristövahinkojen korvaaminen. Kymen tiepiiri
- 58/1992 Teknologian siirto; Bauma 1992 -messut. TIEL 3200108
- 59/1992 Reunapaalujen vaikutus ajokäyttäytymiseen ja liikenneonnettomuuksiin. TIEL 3200109
- 60/1992 Rautasaostuman aiheuttama salaojan tukkeutuminen ja toimenpiteet tukkeutumisen estämiseksi. TIEL 3200110
- 61/1992 Liityntäliikenteen mallit. TIEL 3200111
- 62/1992 Hienoaineksen vaikutus stabiloidun moreenimurskeen pakkaskestävyyteen. TIEL 3200112
- 63/1992 Tulevaisuuden ennustamista vai tulevaisuuden tekemistä? Ympäristö-ongelmien haasteet tielaitoksen tulevaisuudentutkimukselle liikenne- ja ympäristöpolitiikan näkökulmasta. TIEL 3200113
- 64/1992 Bitumiemulssioketiet. TIEL 3200114
- 65/1992 Liikenteen ja maankäytön vuorovaikutus vt 3:lla välillä Helsinki-Tampere. TIEL 3200115
- 66/1992 Kouvolan pohjoisen ohikulkutien vaikutukset maankäyttöön. TIEL 3200116
- 67/1992 Keskushallinnon organisaation uudistaminen, loppuraportti. TIEL 3200117
- 68/1992 Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelma (TPPT); Perussuunnitelma TIEL 3200118
- 69/1992 Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus 1991-1992. TIEL 3200119
- 70/1992 Nastojen, hiekoituksen ja suolauksen aiheuttama pöly ja sen leviäminen ympäristöön, kirjallisuusselvitys. TIEL 3200120
- 71/1992 TAM-Tien Arvon Mittaus, tiivistelmä.
- 72/1992 Yleisten teiden liikenneturvallisuus taajamissa. TIEL 3200122

ISBN 951-47-6856-6  
ISSN 0788-3722  
TIEL 3200123